



## 저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

# Tomographic PIV 계측에 있어서의 영향인자 분석

Analyses of Influence Factors in  
Tomographic PIV Measurements



2018년 2월

한국해양대학교 대학원

냉동공조공학과  
공 대 경

본 논문을 공대경의 공학 석사 학위논문으로 인준함



위원장 : 김의간 (인)

위 원 : 도덕희 (인)

위 원 : 조경래 (인)

2017년 12 월 26 일

한국해양대학교 일반대학원

## 목 차

<b>List of Tables</b> .....	<b>I</b>
<b>List of Figures</b> .....	<b>II</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>VII</b>

### 제1장 서 론

1.1 연구배경 .....	1
1.2 연구목적 및 구성 .....	2

### 제2장 카메라 교정에 의한 오차 영향 분석

2.1 핀홀 카메라 모델 .....	4
2.2 카메라 교정 원리 .....	5
2.3 교정용 가상영상 제작 .....	11
2.4 10-파라미터법과 변환 행렬법 .....	14

### 제3장 복셀영상 재구성 방식에 의한 오차 영향 분석

3.1 영상 재구성 원리 .....	22
3.2 가상 영상 시험 .....	26

## 제4장 유동장 해석 적용

4.1 가상 유동 영상 제작 .....	36
4.2 가상 영상 해석 결과 .....	42
4.3 사각형 몰수체 후류 유동장 실험장치 .....	56
4.4 사각형 몰수체 후류 해석 결과 .....	59

제5장 결론 및 고찰 .....	65
-------------------	----

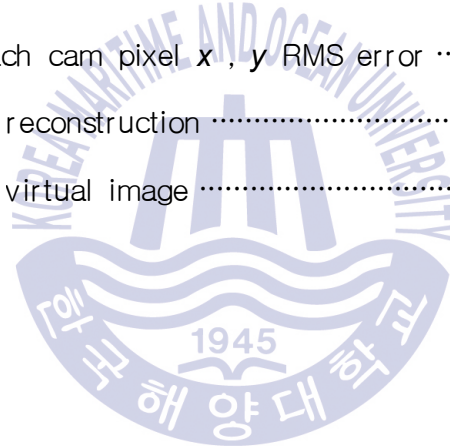
참고문헌 .....	66
------------	----

감사의 글 .....	70
-------------	----



## List of Tables

<b>Table 2.1</b>	Gird spec of virtual image for calibration .....	11
<b>Table 2.2</b>	Each camera parameter of virtual image .....	12
<b>Table 2.3</b>	10 parameter calibration results .....	15
<b>Table 2.4</b>	Transfer matrix calibration results .....	15
<b>Table 2.5</b>	Total and each cam pixel $x$ , $y$ RMS error .....	21
<b>Table 3.1</b>	Condition of reconstruction .....	26
<b>Table 4.1</b>	Condition of virtual image .....	43



## List of Figures

<b>Figure 2.1</b> Pinhole camera model .....	4
<b>Figure 2.2</b> Geometric diagram of pinhole camera model .....	7
<b>Figure 2.3</b> Geometric diagram of relation with camera coordinate system and image coordinate system .....	7
<b>Figure 2.4</b> Projection between camera and world coordinate .....	10
<b>Figure 2.5</b> Virtual image for calibration ( $Z=-10\text{mm}$ ) .....	13
<b>Figure 2.6</b> Pixel errors of $x$ coordinate in camera 1(3D to 2D image, $Z=-2\text{mm}$ ) .....	16
<b>Figure 2.7</b> Pixel errors of $x$ coordinate in camera 1(3D to 2D image, $Z=-1\text{mm}$ ) .....	16
<b>Figure 2.8</b> Pixel errors of $x$ coordinate in camera 1(3D to 2D image, $Z=0\text{mm}$ ) .....	17
<b>Figure 2.9</b> Pixel errors of $x$ coordinate in camera 1(3D to 2D image, $Z=1\text{mm}$ ) .....	17
<b>Figure 2.10</b> Pixel errors of $x$ coordinate in camera 1(3D to 2D image, $Z=2\text{mm}$ ) .....	18
<b>Figure 2.11</b> Pixel errors of $y$ coordinate in camera 1(3D to 2D image, $Z=-2\text{mm}$ ) .....	19

<b>Figure 2.12</b> Pixel errors of y coordinate in camera 1(3D to 2D image, Z=-1mm) .....	19
<b>Figure 2.13</b> Pixel errors of y coordinate in camera 1(3D to 2D image, Z=0mm) .....	20
<b>Figure 2.14</b> Pixel errors of y coordinate in camera 1(3D to 2D image, Z=1mm) .....	20
<b>Figure 2.15</b> Pixel errors of y coordinate in camera 1(3D to 2D image, Z=2mm) .....	21
<b>Figure 3.1</b> Schematic of MLOS .....	24
<b>Figure 3.2</b> Schematic of tomographical reconstruction .....	25
<b>Figure 3.3</b> Schematic of virtual image .....	27
<b>Figure 3.4</b> Camera angle : 10, Particle number : 50, Size : 1 Sigma : 1 .....	28
<b>Figure 3.5</b> Camera angle : 20, Particle number : 50, Size : 1 Sigma : 1 .....	29
<b>Figure 3.6</b> Camera angle : 30, Particle number : 50, Size : 1 Sigma : 1 .....	30
<b>Figure 3.7</b> Camera angle : 30, Particle number : 100, Size : 1 Sigma : 1 .....	31
<b>Figure 3.8</b> Camera angle : 30, Particle number : 200, Size : 1 Sigma : 1 .....	32
<b>Figure 3.9</b> Camera angle : 30, Particle number : 50, Size : 3 Sigma : 2 .....	33
<b>Figure 3.10</b> Camera angle : 30, Particle number : 50, Size : 5 Sigma : 3 .....	34
<b>Figure 4.1</b> Particle density (Number=100,000) .....	37
<b>Figure 4.2</b> Spatial vorticity of 0.125 with velocity	



distribution(displacement=0.05mm) .....	38
<b>Figure 4.3</b> Spatial vorticity of 0.250 with velocity	
distribution(displacement=0.10mm) .....	39
<b>Figure 4.4</b> Spatial vorticity of 0.370 with velocity	
distribution(displacement=0.15mm) .....	40
<b>Figure 4.5</b> Spatial vorticity of 0.500 with velocity	
distribution(displacement=0.20mm) .....	41
<b>Figure 4.6</b> Schematic of 3D PIV calculations .....	43
<b>Figure 4.7</b> Schematic of Tomographic PIV process .....	44
<b>Figure 4.8</b> Spatial vorticity of 0.125 with velocity distribution	
(displacement=0.05mm, number=50,000) .....	45
<b>Figure 4.9</b> Spatial vorticity of 0.250 with velocity distribution	
(displacement=0.10mm, number=50,000) .....	46
<b>Figure 4.10</b> Spatial vorticity of 0.370 with velocity distribution	
(displacement=0.15mm, number=50,000) .....	47
<b>Figure 4.11</b> Spatial vorticity of 0.500 with velocity distribution	
(displacement=0.20mm, number=50,000) .....	48
<b>Figure 4.12</b> Spatial vorticity of 0.370 with velocity distribution	
(displacement=0.15mm, number=5,000) .....	49
<b>Figure 4.13</b> Spatial vorticity of 0.370 with velocity distribution	

(displacement=0.15mm, number=10,000) .....	50
<b>Figure 4.14</b> Spatial vorticity of 0.370with velocity distribution	
(displacement=0.15mm, number=20,000) .....	51
<b>Figure 4.15</b> patial vorticity of 0.370with velocity distribution	
(displacement=0.15mm, number=50,000) .....	52
<b>Figure 4.16</b> patial vorticity of 0.370with velocity distribution	
(displacement=0.15mm, number=100,000) .....	53
<b>Figure 4.17</b> Case 1~4 velocity relate error .....	54
<b>Figure 4.18</b> Case 5~9 velocity relate error .....	54
<b>Figure 4.19</b> Experimental apparatus .....	57
<b>Figure 4.20</b> 4-Camera system .....	58
<b>Figure 4.21</b> Area of experiment .....	58
<b>Figure 4.22</b> Time-mean vector field .....	59
<b>Figure 4.23</b> Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ , $t = 0.00$ ) .....	60
<b>Figure 4.24</b> Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ , $t = 0.01$ ) .....	60
<b>Figure 4.25</b> Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ , $t = 0.02$ ) .....	61
<b>Figure 4.26</b> Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ , $t = 0.03$ ) .....	61
<b>Figure 4.27</b> Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ , $t = 0.04$ ) .....	62
<b>Figure 4.28</b> Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ , $t = 0.05$ ) .....	62
<b>Figure 4.29</b> Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ , $t = 0.06$ ) .....	63

<b>Figure 4.30</b> Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ , $t = 0.07$ ) .....	63
<b>Figure 4.31</b> Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ , $t = 0.08$ ) .....	64
<b>Figure 4.32</b> Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ , $t = 0.09$ ) .....	64



# **Analyses of Influence Factors in Tomographic PIV Measurements**

**by Dae Kyeong Kong**

***Department of Refrigeration and Air-Conditioning Engineering  
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University***

## **Abstract**

In this paper, the influences factors in tomographic PIV calculations are quantitatively investigated.

The error propagation coming from the camera calibration has been investigated, and the error propagation coming from the reconstruction of voxel images, in which MLOS (multiplicative line of sight), MART (multiplicative algebraic reconstruction technique), SMART (simultaneous multiplicative algebraic reconstruction technique) algorithms are adopted, has been investigated.

The influences of the camera calibration method (10-parameter and transfer matrix) to the Tomo-PIV results have been also quantitatively investigated. It has been verified that the 10-parameter method has shown better performance than transfer matrix.

Based on MLOS reconstruction algorithm, the calculation results of Tomo-PIV showed shorter calculation time, and it has been adopted to the calculation of a ring vortex, from which it has been validated that the original flow patterns of the ring vortex has been reconstructed.

Further, the constructed Tomo-PIV system has been adopted to an experimental flow images of the wake of a square bluff body, from which the secondary flow structures of the wake have been clearly captured.

# Tomographic PIV 계측에 있어서의 영향인자 분석

공 대 경

한국해양대학교 대학원 냉동공조공학과

## 초록

본 논문은 Tomographic PIV계산에 있어서 속도벡터의 오차에 영향을 미치는 인자를 분석한다. 영향인자로 카메라교정과 복셀 영상 재구성으로 선정하였으며, MLOS(multiplicative line of sight), MART (multiplicative algebraic reconstruction technique), MART(multiplicative algebraic reconstruction technique), SMART(simultaneous multiplicative algebraic reconstruction technique) 알고리즘을 이용하여 영상을 재구성하였다. 카메라 교정방법으로는 10-parameter법과 변환 행렬법을 선정하여 정량적 분석을 하였으며, 그 결과 10-parameter법이 높은 성능을 보였다.

링와(ring vortex) 형태의 유동장의 가상영상을 이용하여 복셀 영상을 비교적 계산속도가 빠른 MLOS방법으로 재구성한 다음, Tomo-PIV계산을 수행한 결과 링(ring)형태의 유동패턴을 재구성할 수 있었다.

구축한 10-파라미터법, MLOS기반의 Tomo-PIV계산방식으로 사각형 물  
수체 후류에 대한 실험 계산한 결과 2차 와(secondary vortex)를 재현할  
수 있었다.



# 제1장 서론

## 1.1 연구배경

국내 산업체 혹은 연구소에서 주로 사용하는 유동장해석 방법은 전산해석이다. 하지만 전산해석은 실제유동이 아니라 시뮬레이션을 통한 결과이기 때문에 실제 유동장이라고 볼 수 없다. 때문에 실제 유동장해석은 실험을 통해 계측 및 해석하여야 한다.

이때 해석하려는 유동장을 계측하는데 있어 접촉식과 비접촉식 계측으로 나뉘게 되는데 접촉식 계측은 유동장에 센서를 설치하므로 엄밀히 따진다면 측정하려는 유동장과 같은 유동장이라고 볼 수 없다. 때문에 비접촉식 방법으로 계측을 하여야 높은 정밀도의 유동장해석을 진행할 수 있다.

비접촉식 유동장해석 방법 중 하나인 PIV(particle image velocimetry)는 국내외에서 많이 사용하는 방법이다(Adrian; 1991). 국내에서 2차원 PIV에 대한 연구개발은 지속적으로 이루어지고 있으나 해외에 비해 3차원 PIV에 관한 연구개발은 미비하여 해외와의 기술 차이가 해마다 늘고 있다. 때문에 국내에서도 3차원 PIV에 대한 기술개발 및 소프트웨어 제작이 시급하다.

Tomographic PIV 계산수행 시 복셀영상(voxel image)의 재구성(reconstruction)이 가장 중요한데, 복셀영상 재구성의 정밀성은 카메라 교정(camera calibration)의 정확성, 재구성 기법에 따라 달라진다.

본 논문에서는 기존에 사용하던 변환 행렬법(Juyang Weng; 1992)과 10-파라미터법(Doh; 2004)을 비교한다. 아울러, Tomographic PIV에 의한 속도



장 계산에 필요한 실험영상의 재구성 기법인 MLOS, MART, SMART에 대한 비교를 통해 있어서 오차에 미치는 주요 영향인자에 대한 분석을 시도한다.

## 1.2 연구목적 및 구성

본 논문은 3차원 유동장 해석 기법인 Tomographic PIV(이하 Tomo-PIV)에 의한 속도장 계산에 있어서 오차에 미치는 영향인자를 카메라교정과 복셀영상의 재구성으로 설정하고 각 인자에 대한 정량적 평가를 실시하는 것을 연구의 목적으로 삼고 있다. 이를 달성하기 위한 논문의 구성은 다음과 같다.

제 1 장에서는 연구의 배경과 목적에 대하여 소개하고, 제 2장에서는 핀홀카메라 모델(pinhole camera model)의 10-파라미터법(10 parameter calibration)과 변환 행렬법(transfer matrix calibration)에 대한 이론을 기술하고 이들에 대한 정량적 성능 평가를 실시한다.

제 3 장에서는 임의의 3차원 단면상에 존재하는 입자들의 가상영상을 이용하여 재구성기법인 MLOS(multiplicative line of sight), MART(multiplicative algebraic reconstruction technique), SMART(simultaneous multiplicative algebraic reconstruction technique)법의 성능 평가를 실시한다.

제 4 장에서는 링와(ring vortex)에 대한 가상영상을 이동량[mm], 측정

영역 크기 [mm], 속도 [m/s] 등의 조건에 의거 제작하고, 이를 토대로 Tomo-PIV기법을 적용하여 속도장을 계산하고 그 결과를 바탕으로 각 조건에 따른 오차율을 비교한다. 아울러, 회류수조를 이용하여 사각형 물수체 후류에 대한 유동장을 촬영하여 얻어진 영상을 이용하여 구축된 Tomo-PIV기법으로 속도장을 계산한다. 끝으로, 제 5 장에서는 실험결과에 대한 분석과 평가를 정리한다.



## 제2장 카메라 교정에 의한 오차 영향 분석

### 2.1 핀홀 카메라 모델

핀홀 카메라 모델(pinhole camera model)은 Fig. 2.1과 같이 핀홀(pinhole)을 통해서 들어오는 빛을 받아들여 촬영하는 카메라를 의미한다. 핀홀 카메라의 원리는 3차원인 실제 세계에서 빛이 어느 한 점에서 반사 되면, 다양한 각도로 광선이 반사하게 된다. 이때 광선 중에서 핀홀로 향하는 광선만이 핀홀 평면(pinhole plane)에 가로 막히지 않고 영상 평면(image plane)에 맺히게 된다(EH Adelson; 1991).

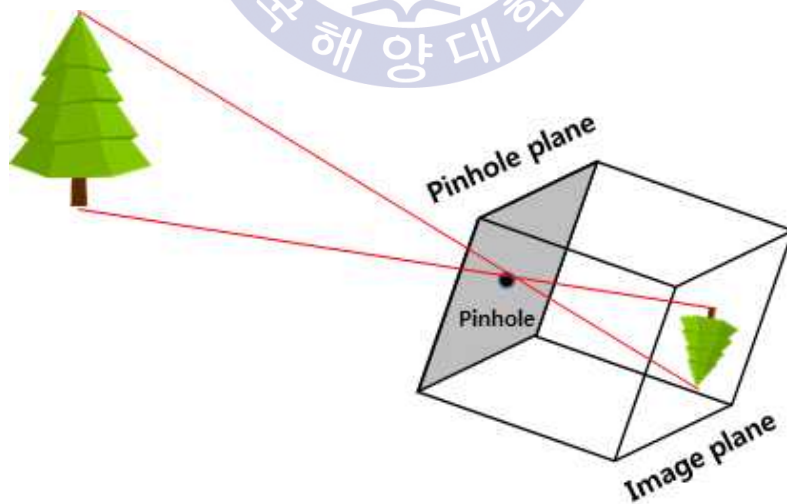


Fig. 2.1 Pinhole camera model

## 2.2 카메라 교정 원리

복잡한 3차원 유동을 비점축식으로 계측하기 위해서는 2대 또는 그 이상의 카메라를 이용한 영상(image)이 필요하다. 이때 얻어진 영상과 정량적인 3차원 위치 값을 매칭(matching)하기 위해서는 카메라좌표계(camera coordinate)와 절대 좌표계(world coordinate)사이의 정확한 관계를 알 수 있어야 한다. 그 관계를 알 수 있도록 수치적으로 데이터화 하는 과정을 카메라 교정이라 한다.

본 논문에서는 일반적으로 사용하는 변환 행렬법과 Doh 등(2004)이 제시한 10-파라미터법을 적용하여 더 높은 정확도를 가진 방법을 채택한다.

변환 행렬법은 핀홀 카메라 모델을 기하학적으로 표현할 때 Fig. 2.2와 같이 나타낸다. 식 (2.1)은 카메라좌표계와 영상 좌표계의 관계를 나타내고 식 (2.2)는 카메라좌표계와 절대좌표계의 관계를 나타낸다.

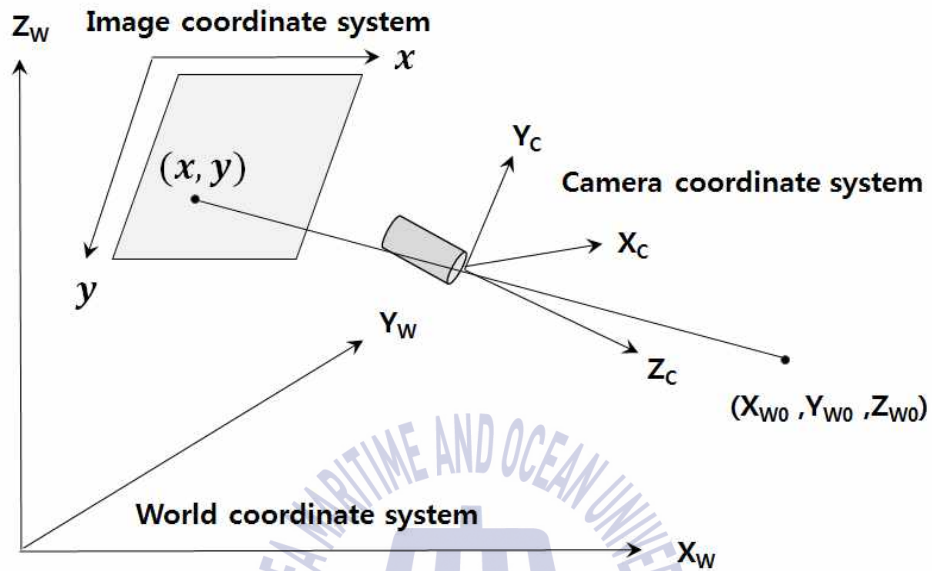
식 (2.2)에서의  $A$ 는 카메라 내부 파라미터(intrinsic parameters)에 대한 항이며 초점거리( $f_x, f_y$ : focal length), 주점( $c_x, c_y$ : principal point), 비대칭 계수( $skew\_c$ : skew coefficient)에 관한 내용을 담고 있으며 투영 변환(projective transformation)을 의미한다(R Szeliski; 2010). 이때 최신 카메라에서의  $skew\_c$ 는 0에 근접한 값으로 무시할 수 있는 수준이다.  $[R | T]$ 는 카메라 외부 파라미터(extrinsic parameters)에 대한 항이며 회전(rotation) 및 평행이동(translation) 변환에 관한 내용을 담고 있으며 유클리디언 변

환(euclidean transformation)을 의미한다. 최신 카메라에서 렌즈 왜곡항  $\kappa_1, \kappa_2, r_c$  는 0에 근접한 값으로 무시할 수 있을 수준이다.

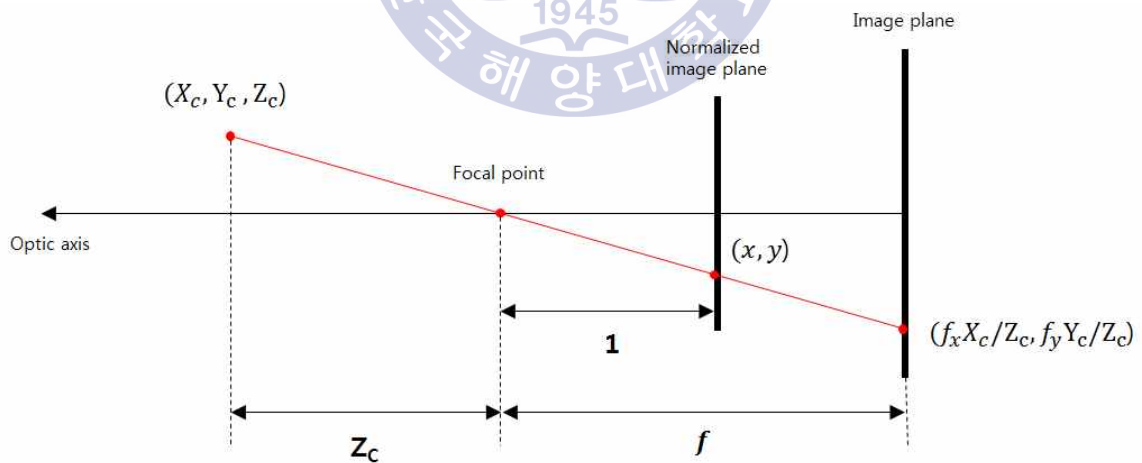
$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{X_C}{Z_C} \\ \frac{Y_C}{Z_C} \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & (skew\_c) \cdot f_x & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_1 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_2 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$= A[R \mid T] \begin{bmatrix} X_W \\ Y_W \\ Z_W \\ 1 \end{bmatrix}$$



**Fig. 2.2** Geometric diagram of pinhole camera model



**Fig. 2.3** Geometric diagram of relation with camera coordinate system and image coordinate system

10-파라미터법은  $(c, dis, \alpha, \beta, \gamma, m_x, m_y)$  7개의 외부변수와 3개의 내부변수( $k_1, k_2, r$ )를 가지는 관측방정식이다.  $\alpha, B, \gamma$  는 카메라 좌표계와 절대좌표계의 각  $X, Y, Z$  축이 일치하도록 하는 회전각을 의미한다. 회전된 절대 좌표점을  $(X_m, Y_m, Z_m)$ 으로 표시하고 카메라 좌표계의  $Z_C$ 축과 절대좌표계의  $Z_W$ 축을 일치시키기 위한 이동량을  $m_x, m_y$ 으로 표시한다. 두 좌표계 사이의 모든 점에 대해서 공선식(collinear equation)은 식 (2.3), (2.4)와 같이 나타낼 수 있으며  $c_x, c_y$ 는 좌표계에서의 x,y성분의 초점거리를 의미한다. Fig. 2.4는 이와 같은 관계에 대한 모식도이다.  $\Delta x, \Delta y$ 는 렌즈의 왜곡을 의미하며 식(2.5), (2.6), (2.7)로 나타낼 수 있다. 최근 카메라의  $\Delta x, \Delta y$  값은 0에 근접한 값으로 무시할 수 있을 수준이다.

$$x = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta x \quad (2.3)$$

$$y = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} + \Delta y \quad (2.4)$$

$$\Delta x = \frac{x}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (2.5)$$

$$\Delta y = \frac{y}{r} (k_1 r^2 + k_2 r^4) \quad (2.6)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (2.7)$$

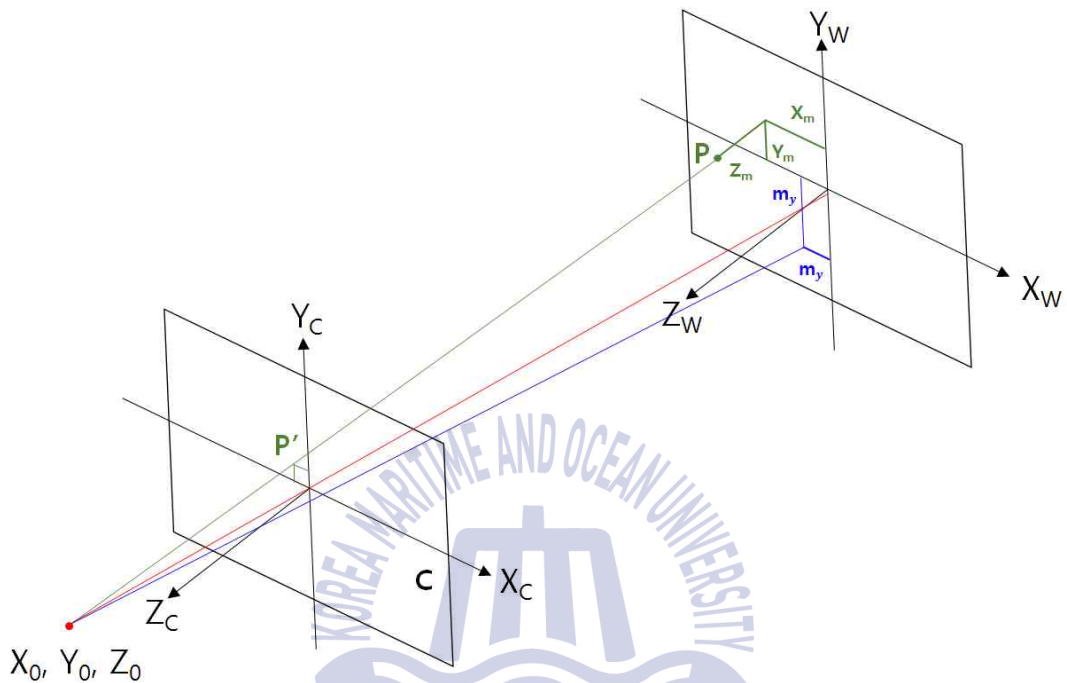
식(2.3), (2.4)는 식(2.8), (2.9)로 변환이 가능하다.

$$F = c_x \frac{X_m - m_x}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (x - \Delta x) = 0 \quad (2.8)$$

$$G = c_y \frac{Y_m - m_y}{\sqrt{dis^2 - m_x^2 - m_y^2} - Z_m} - (y - \Delta y) = 0 \quad (2.9)$$

식 (2.8)과 (2.9)의 F, G 방정식은 비선형 연립 방정식이므로 이에 대한 해를 구하기 위해 Gauss-Newton법을 사용한다.





**Fig. 2.4** Projection between camera and world coordinate

$X_W, Y_W, Z_W$  : 절대 좌표계

$X_C, Y_C, Z_C$  : 카메라 좌표계

$m_x, m_y$  : 중심축의 이동량

$X_m, Y_m, Z_m$  :  $X_W, Y_W, Z_W$ 축에 의한 회전된 입자 좌표

$X_0, Y_0, Z_0$  : 카메라 중심의 위치(절대 좌표계)

$c$  : 투영면(초점거리)

$P$  : 공간상의 입자

$P'$  : 카메라상의 입자

## 2.3 교정용 가상영상 제작

앞서 소개한 카메라 교정에 대한 정량적인 평가를 위해서는 가상데이터가 필요하다. 가상데이터는 영상의 형태로 Table 2.1과 같은 조건의 격자점을 Table 2.2의 카메라 변수 값을 통해 영상의 픽셀(pixel)위치 값으로 변환시켰다. 변환된 격자점을 식 (2.10)과 같이 가우시안 계조치 분포 (Gaussian intensity distribution)로 나타내어 512 x 512 pixel 의 해상도를 가진 영상을 Fig. 2.5와 같이 생성하였다.

$$I(X) = I_0 e^{\left(-\frac{X-X_c}{2\sigma^2}\right)} \quad (2.10)$$

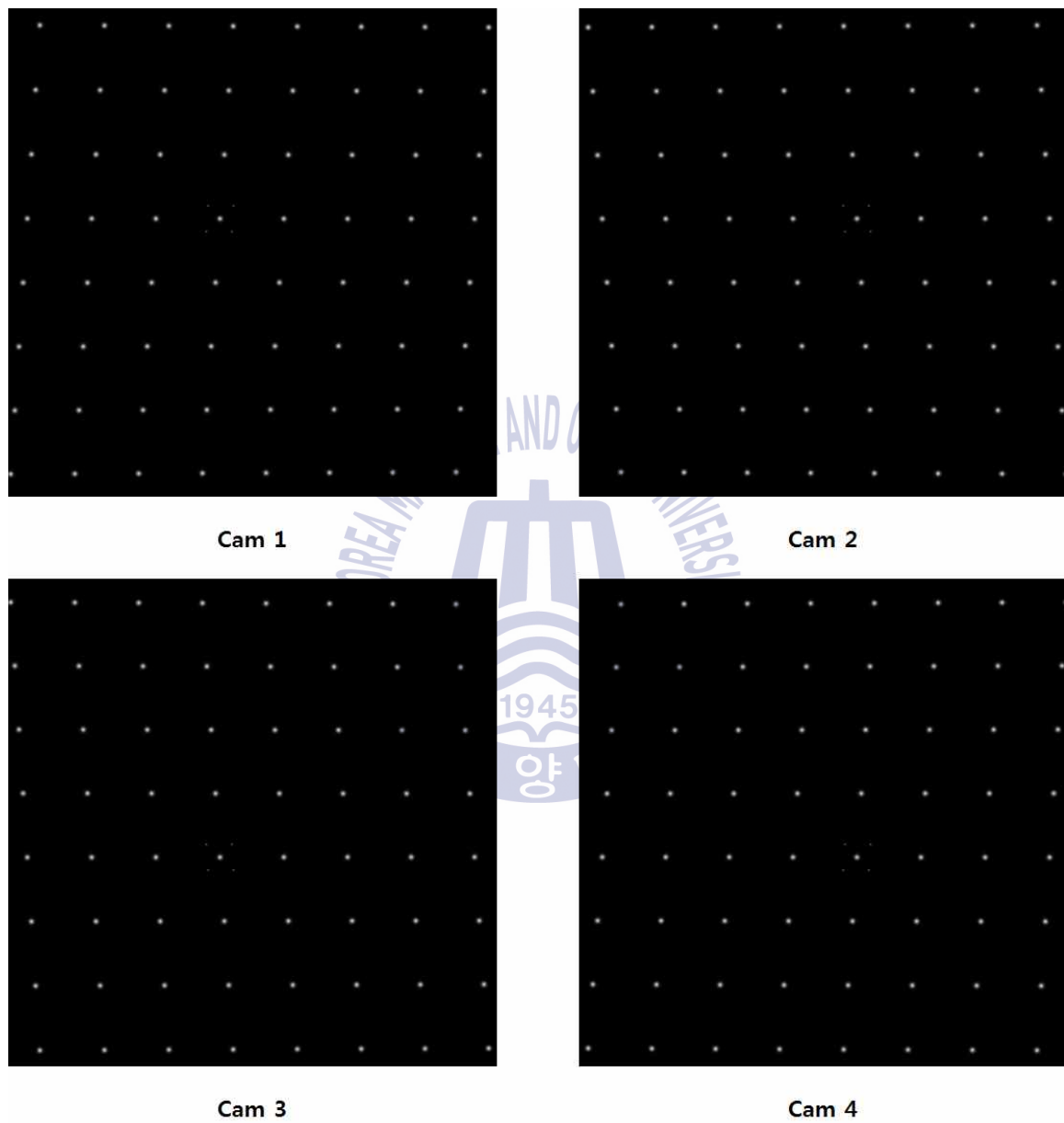
$I_0$  는 최대 입자 밝기,  $X_c$ 는 입자의 무게 중심,  $\sigma$ 는 표준편차를 의미한다.

	Minimum[mm]	Maximum[mm]	Gap[mm]
X	-20	20	5
Y	-20	20	5
Z	-10	10	5

**Table 2.1** Grid spec of virtual image for calibration

10 parameter				
Cam	1	2	3	4
$dis$	1000	1000	1000	1000
$c$	14000	14000	14000	14000
$\alpha$	0.261799	0.261799	-0.2618	-0.2618
$\beta$	0.261799	-0.2618	0.261799	-0.2618
$\gamma$	0	0	0	0
$m_x$	0	0	0	0
$m_y$	0	0	0	0
transfer matrix				
Cam.1	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$
$a_{1j}$	13.5892	0.87382	3.26114	256
$a_{2j}$	0.06625	-13.587	3.38461	256
$a_{3j}$	0.00025	-0.0002	-0.0009	1
Cam.2	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$
$a_{1j}$	13.4567	-1.0018	-3.7388	256
$a_{2j}$	-0.0662	-13.587	3.38461	256
$a_{3j}$	-0.0002	-0.0002	-0.0009	1
Cam.3	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$
$a_{1j}$	13.5892	-0.8738	3.26114	256
$a_{2j}$	0.06625	-13.459	-3.8623	256
$a_{3j}$	0.00025	0.00025	-0.0009	1
Cam.4	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$
$a_{1j}$	13.4567	1.00182	-3.7388	256
$a_{2j}$	-0.0662	-13.459	-3.8623	256
$a_{3j}$	-0.0002	0.00025	-0.0009	1

**Table 2.2** Each camera parameter of virtual image



**Fig. 2.5** Virtual image for calibration ( $Z=-10\text{mm}$ )

## 2.4 10-파라미터법과 변환 행렬법

2.3절에서 제작한 카메라교정 성능평가를 위한 가상영상에서 가우시안 마스크(Gaussian mask)기반의 중심점(centroid) 찾기를 실시하였다. 중심점 찾기가 완료된 점을 기반으로 10-파라미터법과 변환 행렬법에 의한 카메라 교정을 각각 수행하였다. Table 2.3과 Table 2.4는 각각의 방식에 대하여, 3차원 기준좌표로부터 얻어지는 기준파라미터(reference parameter) 값과 이 기준파라미터에 의하여 생성되는 가상영상을 이용하여 재계산되는 파라미터 값을 나타낸다.

Fig. 2.6 ~ Fig. 2.15는 기준파라미터 값에 의하여 생성된 가상영상의 좌표값과 가상영상을 이용하여 재계산되는 파라미터에 의하여 재차 생성된 카메라1의 2차원 사진좌표 값과의 차이를 나타낸다.

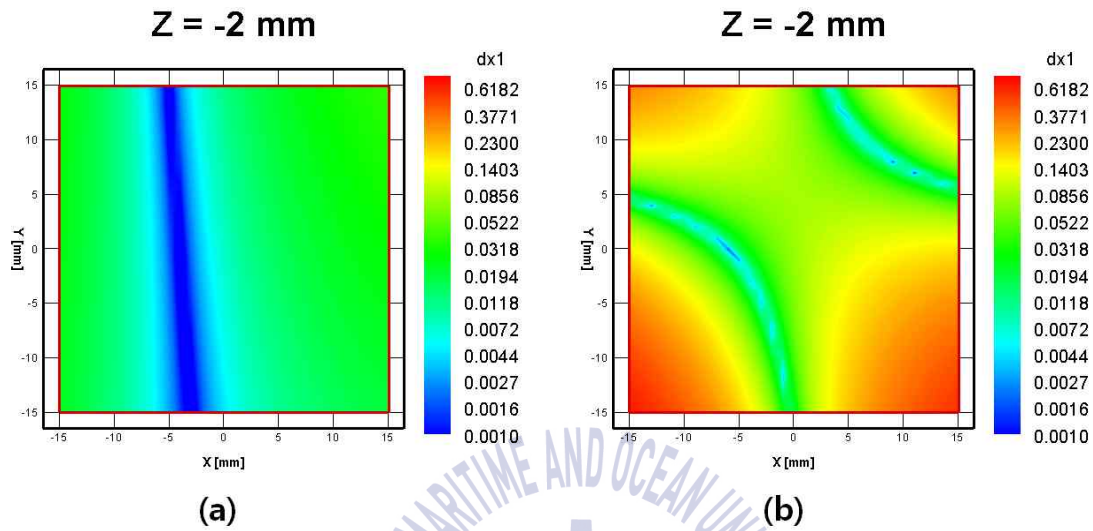
10-파라미터법에 의한 카메라 교정 결과 값에서  $dx, dy$ 의 최댓값은 약 0.04, 0.05픽셀 이고 변환 행렬법의 카메라 교정의 결과는 약 0.74, 2.77픽셀이다. Table 4.5는 각 카메라의  $dx, dy$  및 4대 카메라의  $dx, dy$ 에 대한 RMS Error(root mean square)값을 보여준다. 이는 변환 행렬법을 이용하는 것이 적합하지 않다는 것을 보여준다.

	Reference parameter				10 parameter calibration			
Cam	1	2	3	4	1	2	3	4
$dis$	1000	1000	1000	1000	1008.284	1004.792	1003.740	1000.209
$c$	14000	14000	14000	14000	14114.21	14065.52	14050.58	14001.35
$\alpha$	0.261799	0.261799	-0.2618	-0.2618	0.261858	0.261866	-0.261853	-0.261862
$\beta$	0.261799	-0.2618	0.261799	-0.2618	0.261856	-0.261845	0.261858	-0.261847
$\gamma$	0	0	0	0	0.000040	-0.000041	-0.000037	0.000038
$m_x$	0	0	0	0	0.000470	-0.000303	0.000329	-0.000163
$m_y$	0	0	0	0	0.000038	0.000152	-0.000099	-0.000213

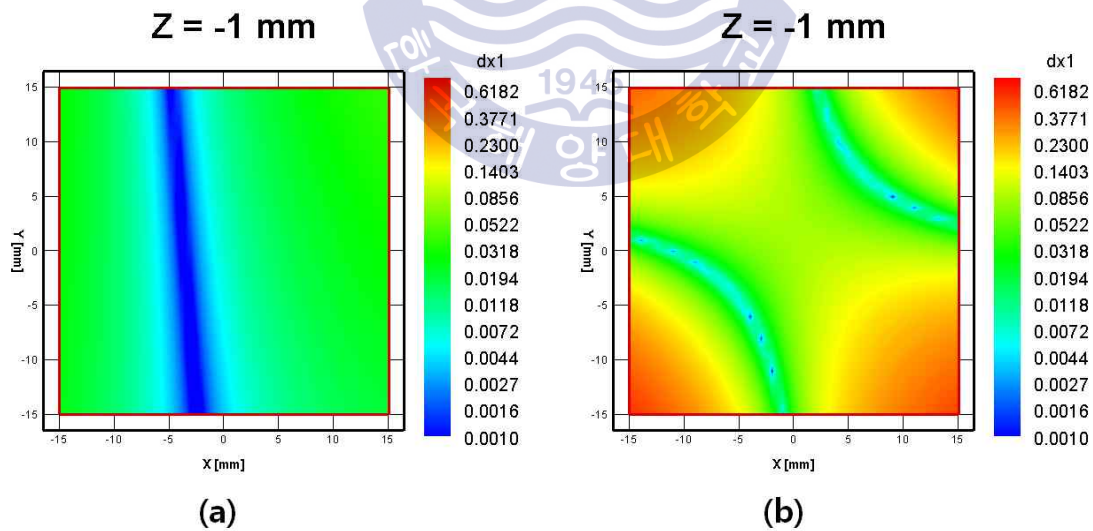
**Table 2.3** 10 parameter calibration results

Reference parameter					transfer matrix calibration				
Cam 1	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$	Cam 1	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$
$a_{1j}$	13.5892	0.87382	3.26114	256	$a_{1j}$	13.5920	0.91208	3.38343	256.082
$a_{2j}$	0.06625	-13.587	3.38461	256	$a_{2j}$	0.07265	-13.662	3.62507	256.490
$a_{3j}$	0.00025	-0.0002	-0.0009	1	$a_{3j}$	0.00028	-0.0001	-0.0004	1.00000
Cam 2	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$	Cam 2	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$
$a_{1j}$	13.4567	-1.0018	-3.7388	256	$a_{1j}$	13.4479	-0.9616	-3.6193	255.921
$a_{2j}$	-0.0662	-13.587	3.38461	256	$a_{2j}$	-0.0716	-13.662	3.62462	256.495
$a_{3j}$	-0.0002	-0.0002	-0.0009	1	$a_{3j}$	-0.0002	-0.0001	-0.0004	1.00000
Cam 3	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$	Cam 3	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$
$a_{1j}$	13.5892	-0.8738	3.26114	256	$a_{1j}$	13.5985	-0.8127	3.40884	256.065
$a_{2j}$	0.06625	-13.459	-3.8623	256	$a_{2j}$	0.07723	-13.487	-3.6262	256.171
$a_{3j}$	0.00025	0.00025	-0.0009	1	$a_{3j}$	0.00031	0.00048	-0.0003	1.00000
Cam 4	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$	Cam 4	$a_{i1}$	$a_{i2}$	$a_{i3}$	$a_{i4}$
$a_{1j}$	13.4567	1.00182	-3.7388	256	$a_{1j}$	13.4431	1.06126	-3.5961	255.937
$a_{2j}$	-0.0662	-13.459	-3.8623	256	$a_{2j}$	-0.0760	-13.486	-3.6260	256.170
$a_{3j}$	-0.0002	0.00025	-0.0009	1	$a_{3j}$	-0.0003	0.00049	-0.0003	1.00000

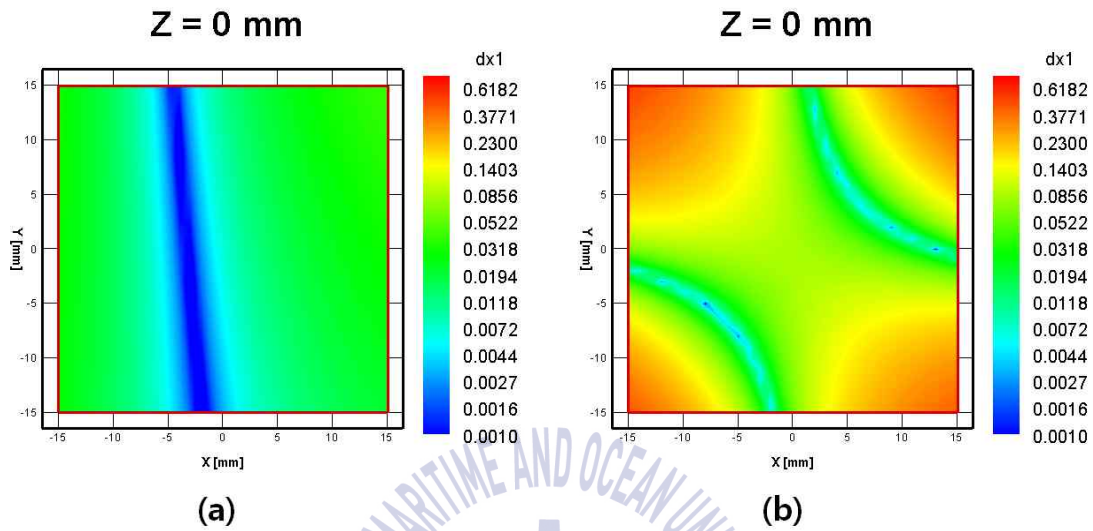
**Table 2.4** Transfer matrix calibration results



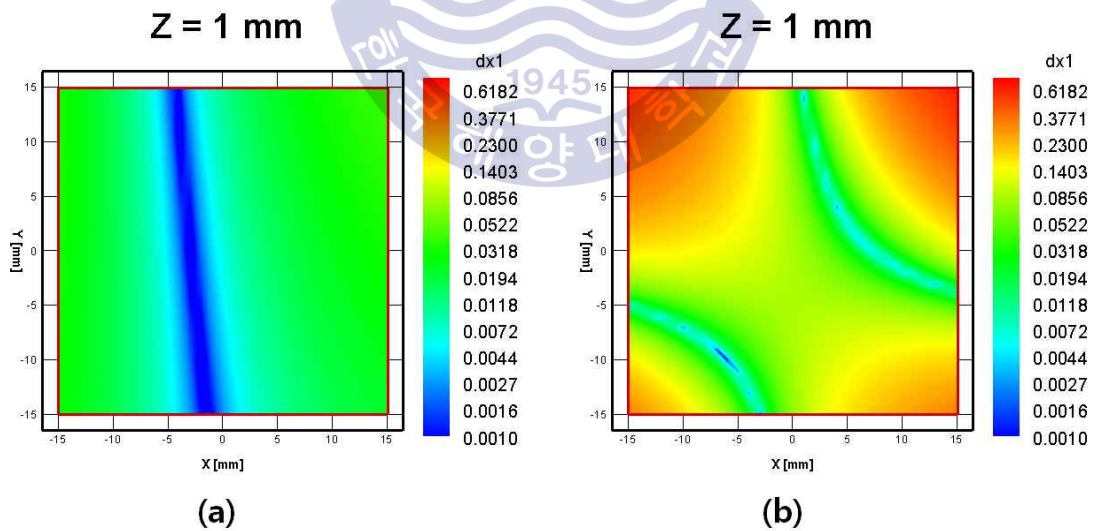
**Fig. 2.6** Pixel errors of  $x$  coordinate in camera 1(3D to 2D image,  $Z=-2\text{mm}$ )  
 (a) 10 parameter calibration (b) transfer matrix calibration



**Fig. 2.7** Pixel errors of  $x$  coordinate in camera 1(3D to 2D image,  $Z=-1\text{mm}$ )  
 (a) 10 parameter calibration (b) transfer matrix calibration

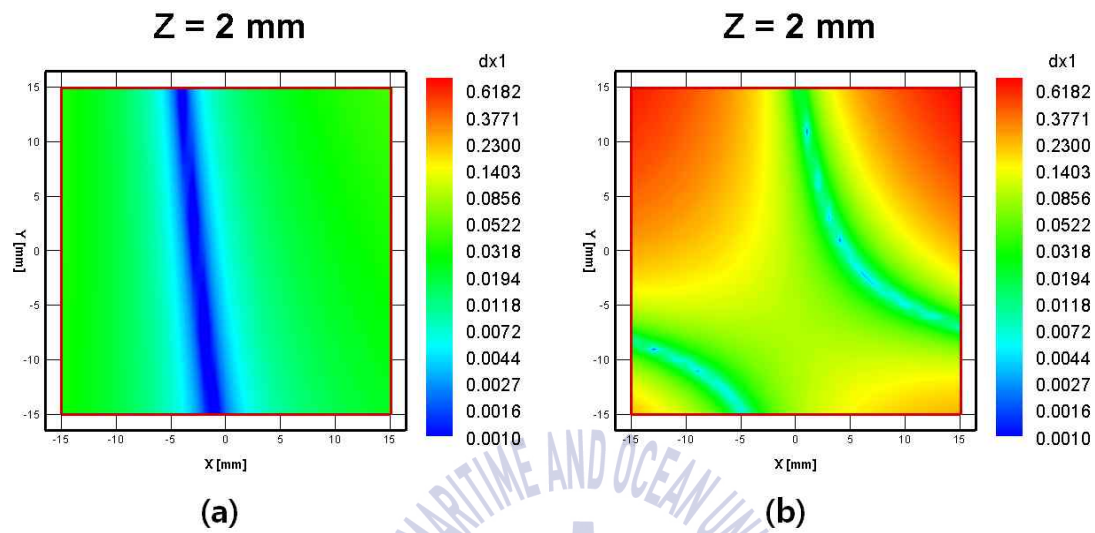


**Fig. 2.8** Pixel errors of  $x$  coordinate in camera 1(3D to 2D image,  $Z=0\text{mm}$ )  
 (a) 10 parameter calibration (b) transfer matrix calibration

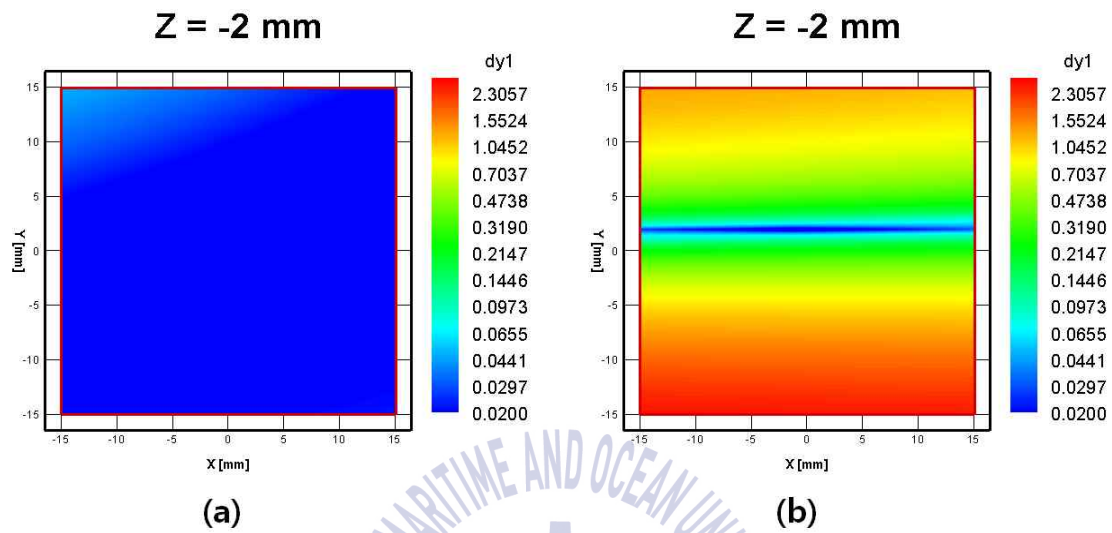


**Fig. 2.9** Pixel errors of  $x$  coordinate in camera 1(3D to 2D image,  $Z=1\text{mm}$ )  
 (a) 10 parameter calibration (b) transfer matrix calibration

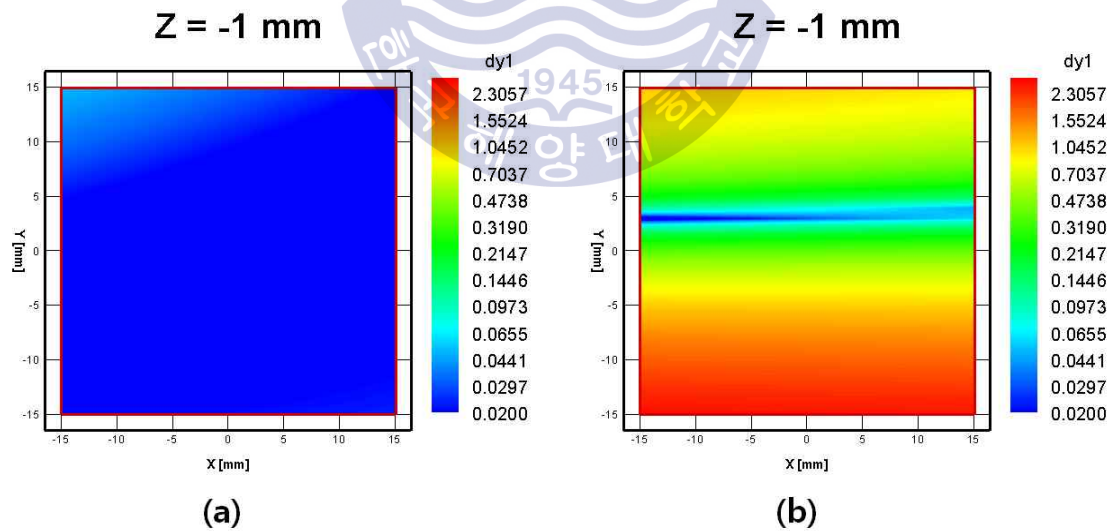




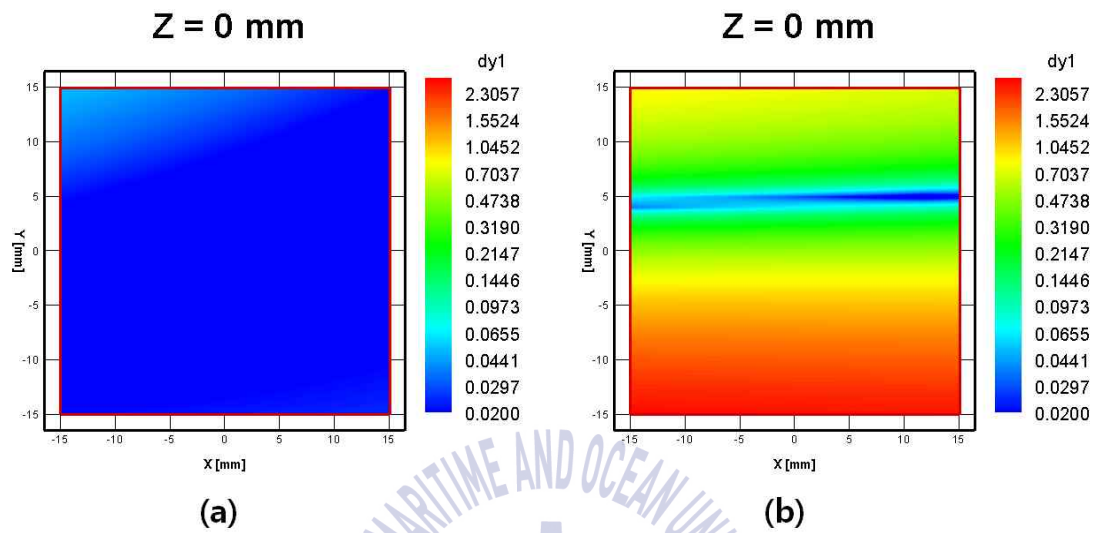
**Fig. 2.10** Pixel errors of  $x$  coordinate in camera 1(3D to 2D image,  $Z=2\text{ mm}$ )  
 (a) 10 parameter calibration (b) transfer matrix calibration



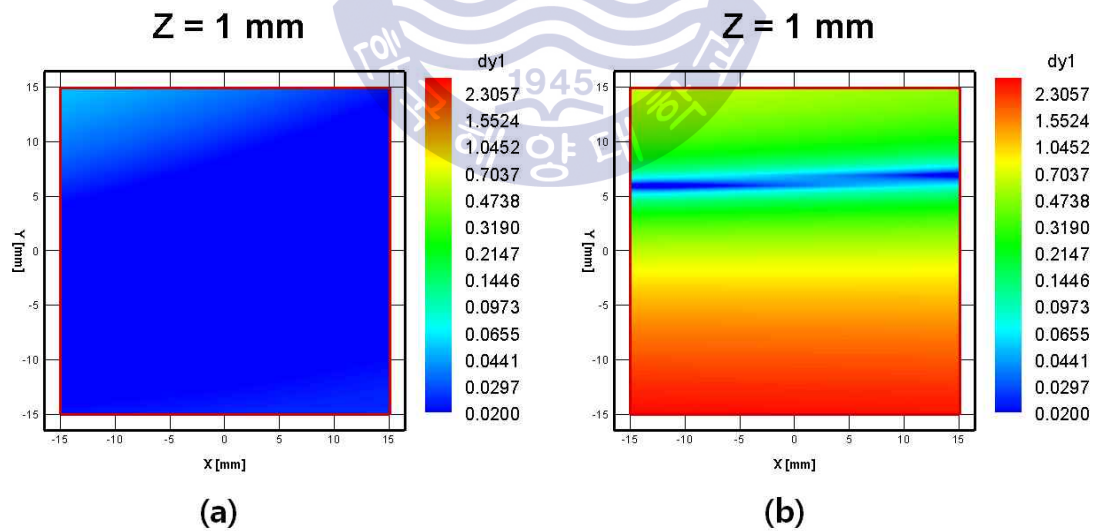
**Fig. 2.11** Pixel errors of y coordinate in camera 1 (3D to 2D image,  $Z = -2$  mm)  
(a) 10 parameter calibration (b) transfer matrix calibration



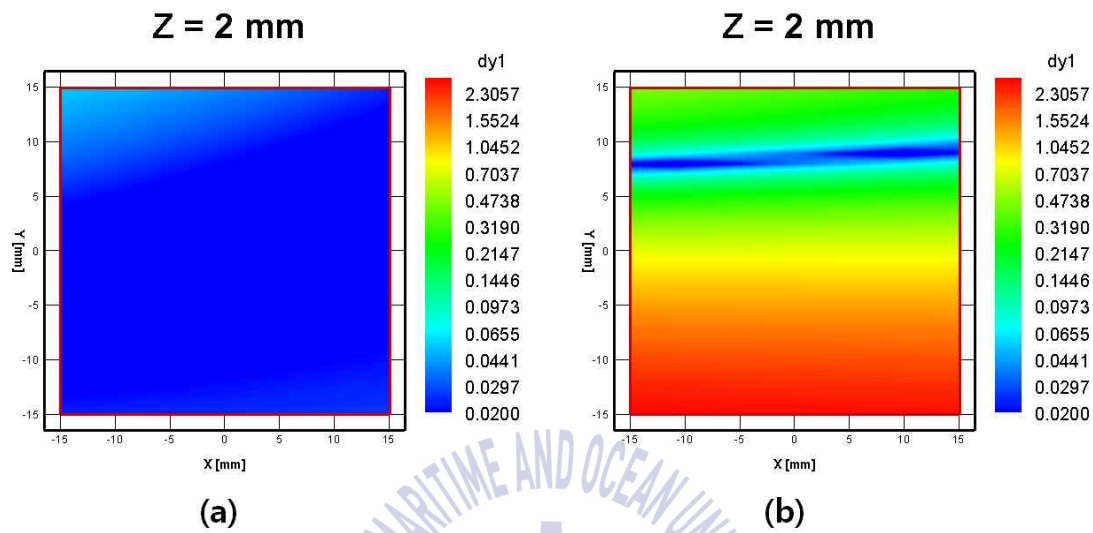
**Fig. 2.12** Pixel errors of y coordinate in camera 1 (3D to 2D image,  $Z = -1$  mm)  
(a) 10 parameter calibration (b) transfer matrix calibration



**Fig. 2.13** Pixel errors of y coordinate in camera 1(3D to 2D image, Z=0mm)  
(a) 10 parameter calibration (b) transfer matrix calibration



**Fig. 2.14** Pixel errors of y coordinate in camera 1(3D to 2D image, Z=1mm)  
(a) 10 parameter calibration (b) transfer matrix calibration



**Fig. 2.15** Pixel errors of y coordinate in camera 1(3D to 2D image, Z=2mm)  
(a) 10 parameter calibration (b) transfer matrix calibration

	10 parameter	transfer matrix
<i>Total</i>	0.018303	0.794304
$dx_1$	0.018044	1.228521
$dy_1$	0.017969	0.189684
$dx_2$	0.019246	1.232342
$dy_2$	0.018248	0.270481
$dx_3$	0.018068	0.937229
$dy_3$	0.017633	0.278811
$dx_4$	0.019245	0.958333
$dy_4$	0.0179	1.108386

**Table 2.5** Total and each cam pixel x , y  
RMS error

## 제3장 복셀영상 재구성 방식에 의한 오차 영향 분석

### 3.1 영상 재구성 원리

Tomo-PIV에서 가장 중요한 부분은 3차원 공간에 있어서의 속도 3성분 (3C3D, 3-component 3-dimensional)을 해석할 측정영역에 대한 입자영상의 3차원 강도 맵(voxel image)을 결정하는 것이다. 이를 위해서 컴퓨터 단층 촬영기법을 이용한다.

컴퓨터 단층 촬영(CT, computer tomography)은 의학계 및 천문학계에서 주로 사용되는 기법이다. 의학계에서는 인체 내부의 2차원 단면을 얻기 위해 X선을 이용하여 얻은 흡수강도 데이터를 적절한 변환을 거쳐 단면 영상을 재구성하고(C.T. Chen; 1995) 천문학계에서는 우주를 촬영한 2차원 영상을 바탕으로 3차원 우주지도를 재구성하는데 이용한다(MG Kivelson; 1995).

본 논문에서는 위와 같이 3차원 영상정보를 재구성함에 있어서 전술의 2차원 가상영상을 이용하여 MLOS(multiplicative line of sight)(Atkinson and Soria; 2009), MART(multiplicative algebraic reconstruction technique)(Herman and Lent; 1976), SMART(simultaneous multiplicative algebraic reconstruction technique)기법(Atkinson and Soria; 2009) 적용을 통하여 재구성법들 간의 성능을 평가하였다.

3차원 유동장을 촬영한 영상의 픽셀은 식(3.1)과 같이 Pixel' s line of sight에 대한 강도(intensity)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$P_i = \int_{-\infty}^{\infty} I(x, y, z) ds_i \quad (3.1)$$

$P_i$  : Pixel value

$I(x, y, z)$  : Intensity source of particle field

$s_i$  : pixel' s line-of-sight

하지만 카메라 영상과 재구성할 복셀 영역은 이산적인 데이터이기 때문에 연속적인 데이터에 대한 식(3.1)을 식(3.2)와 같이 이산적인 데이터에 대한 식으로 변형하였다.

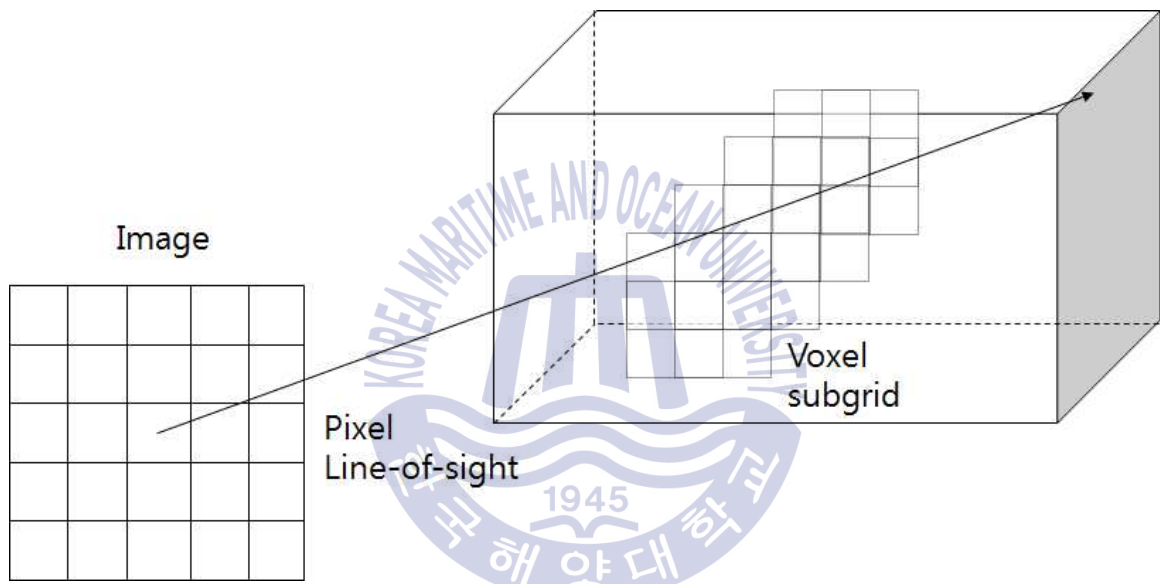
$$P_i \approx \sum_j W_{ij} I_j \quad (3.2)$$

$W_{ij}$  : Weight of converting voxel to pixel

$I_j$  : Voxel value

식(3.2)를 바탕으로 영상에서 3차원 복셀 영역에 대한 재구성시에 Fig.

3.1과 같이 MLOS방법을 사용하여 복셀 강도 초기값을 설정하였다.



**Fig. 3.1** Schematic of MLOS

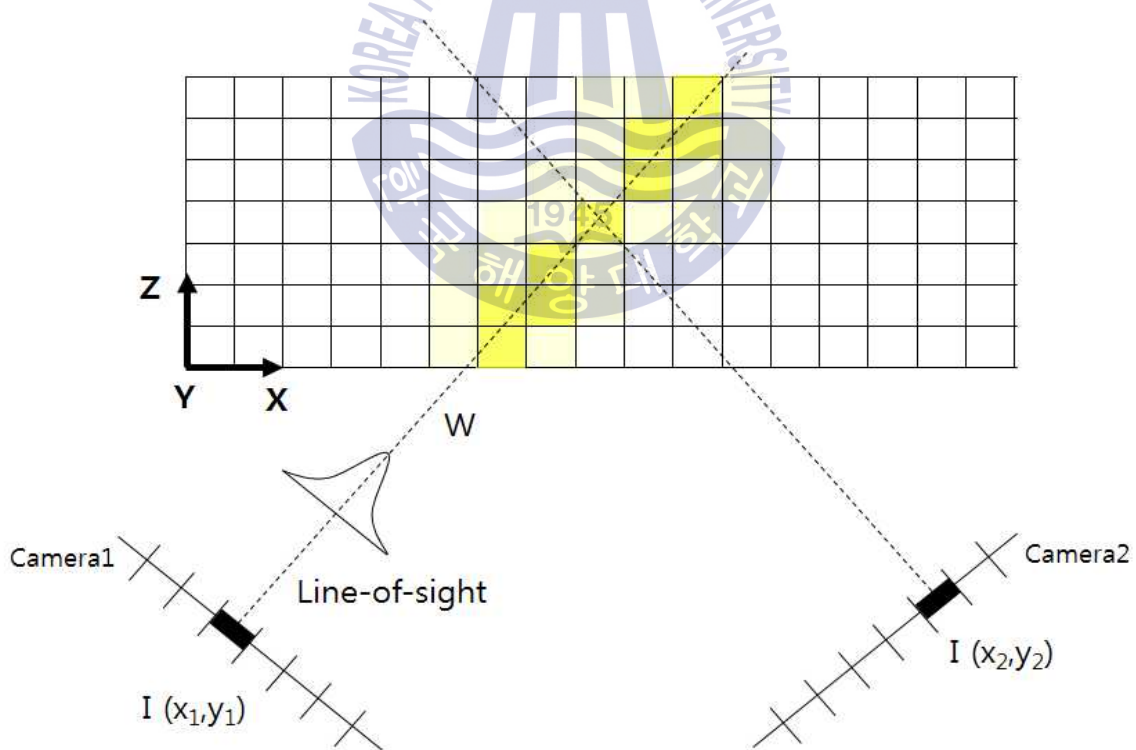
초기 값 설정이 된 복셀영상에 대해 MART 및 SMART법을 이용하여 재 구성의 정밀성을 높인다. 식(3.3)은 MART법의 계산식을 나타낸다.

$$I_j^{k+1} = I_j^k \left( \frac{P_i}{\sum_j W_{ij} I_j^k} \right)^{\mu W_{ij}} \quad (3.3)$$

$\mu$ 는 계산의 수렴속도를 높이기 위한 가중치로 0~2 사이 값을 쓴다.(Gordon et al; 1970) 식(3.4)는 SMART법의 계산식을 나타낸다.

$$I_j^{k+1} = I_j^k \prod_i^{N_i} \left[ \left( \frac{P_i}{\sum_n W_{in} I_n^k} \right)^{\mu W_{ij}} \right]^{1/N_i} \quad (3.4)$$

Fig. 3.2는 입자 재구성의 원리에 대한 모식도이다.



**Fig. 3.2.** Schematic of tomographical reconstruction

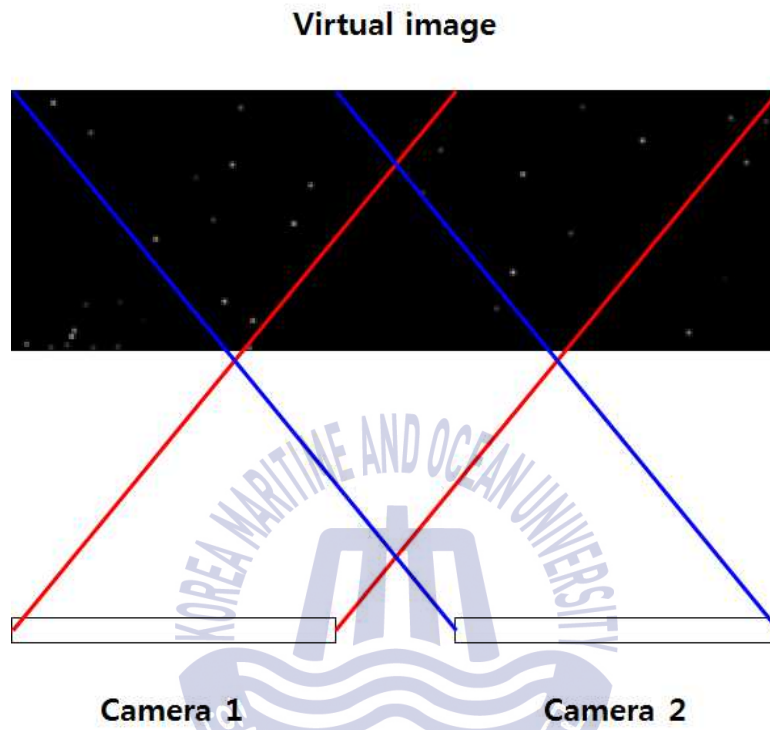


## 3.2 가상 영상 시험

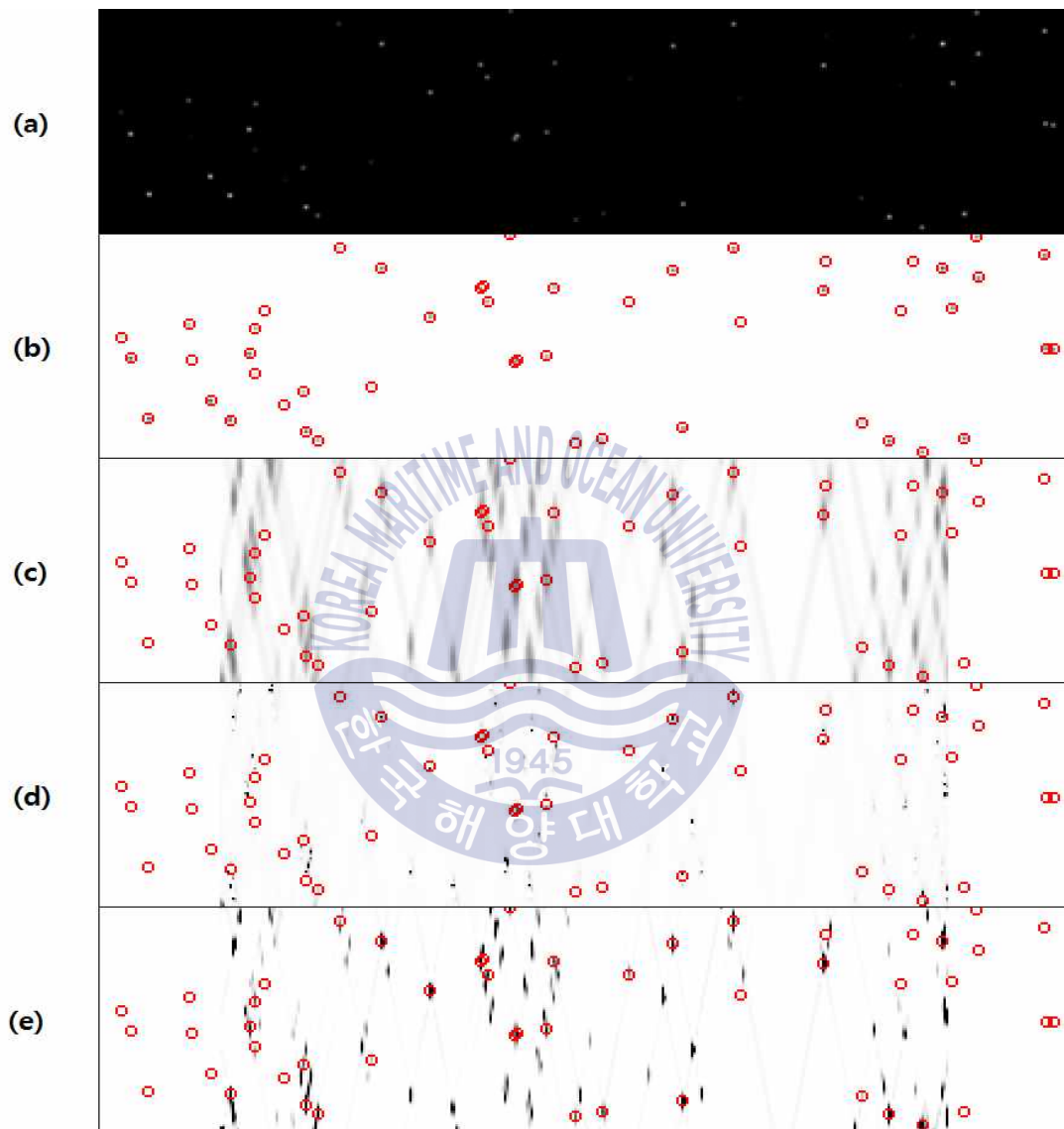
MLOS, MART, SMART의 재구성 정도를 알아보기 위해 가상영상을 제작한다. 가상영상은 Fig. 3.3과 같은 모델로 제작되며 영상의 해상도는 400 x 100 pixel이다. 재구성(reconstruction)에 적합한 가상영상 제작을 위해 3가지 요소(카메라 각도, 입자 개수, 입자크기)를 변화하며 제작하였다. 이때 입자는 식(2.10)과 같이 계조치 분포로 생성하며 나머지 조건은 Table 4.4같이 설정하였다. MART와 SMART의 결과 값은 강도에 40배를 해준 값이다.

	Camera angle	Particle number	Particle size	Sigma
<b>Fig 3.4</b>	10	50	1	1
<b>Fig 3.5</b>	20	50	1	1
<b>Fig 3.6</b>	30	50	1	1
<b>Fig 3.7</b>	30	100	1	1
<b>Fig 3.8</b>	30	200	1	1
<b>Fig 3.9</b>	30	50	3	2
<b>Fig 3.10</b>	30	50	5	3

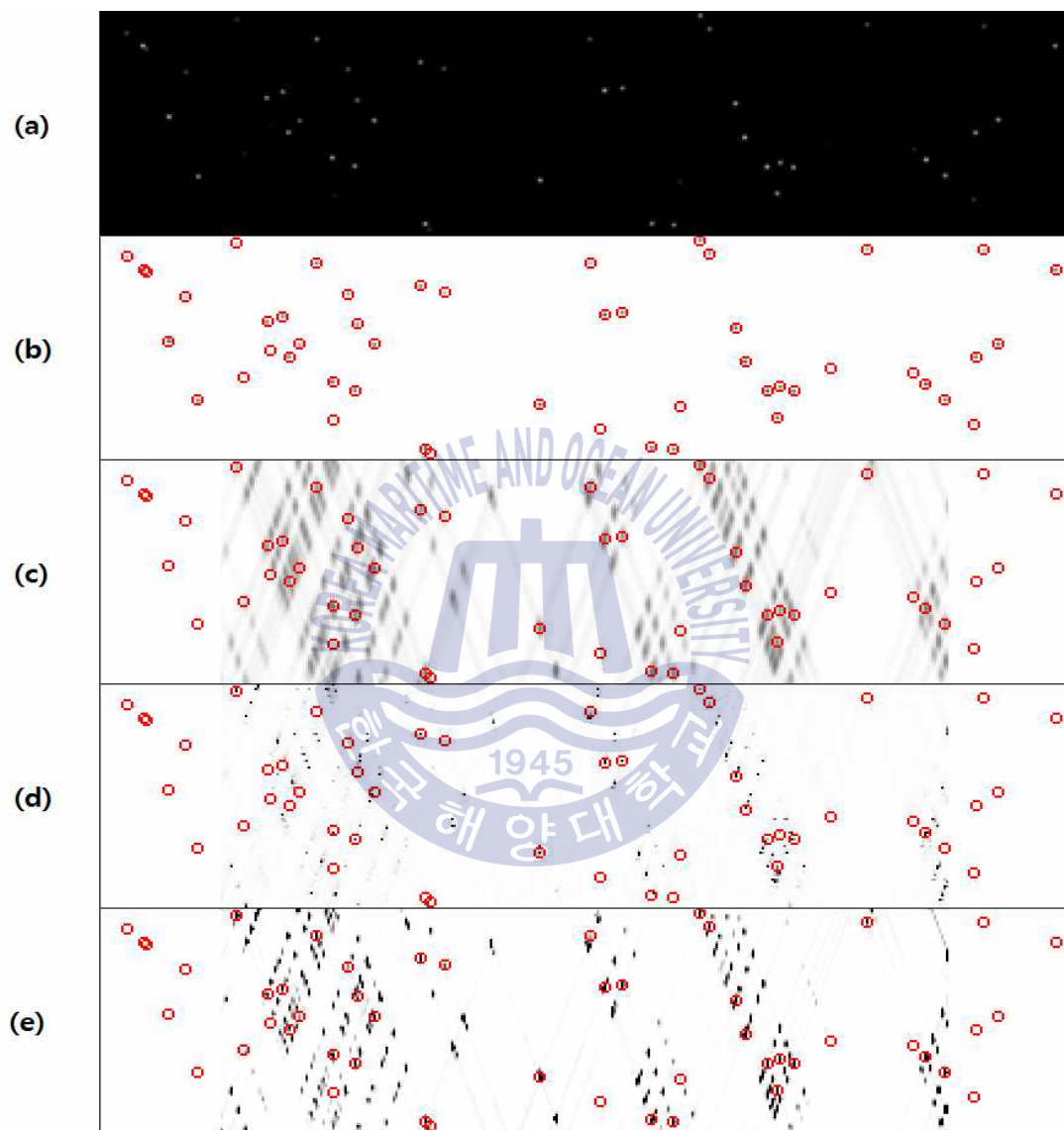
**Table 3.1** Condition of reconstruction



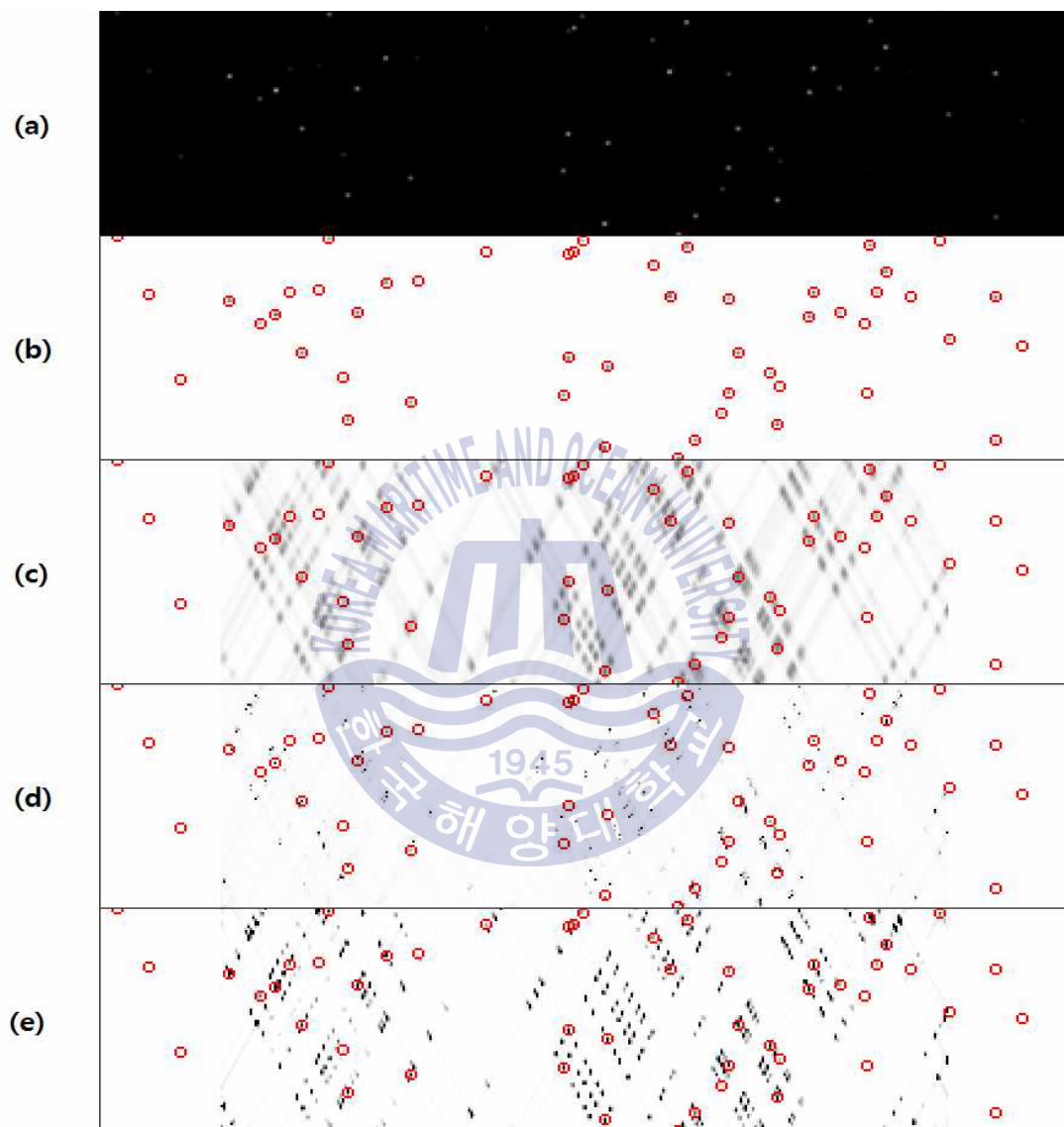
**Fig. 3.3** Schematic of virtual image



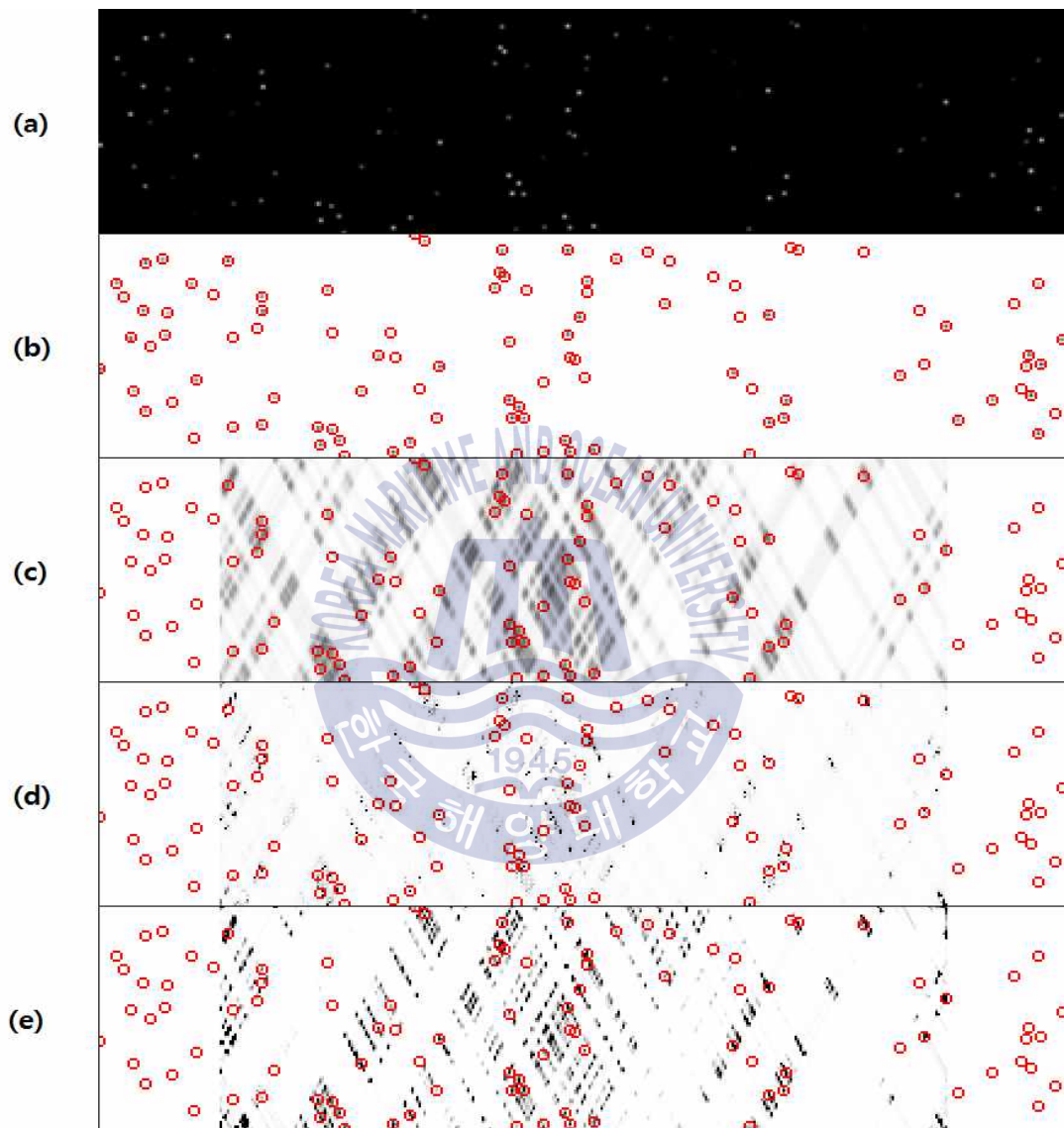
**Fig. 3.4** Camera angle : 10, Particle number : 50, Size : 1 Sigma : 1  
 (a) Original (b) Inverse original (c) MLOS (d) MART (e) SMART



**Fig. 3.5** Camera angle : 20, Particle number : 50, Size : 1 Sigma : 1  
 (a) Original (b) Inverse original (c) MLOS (d) MART (e) SMART

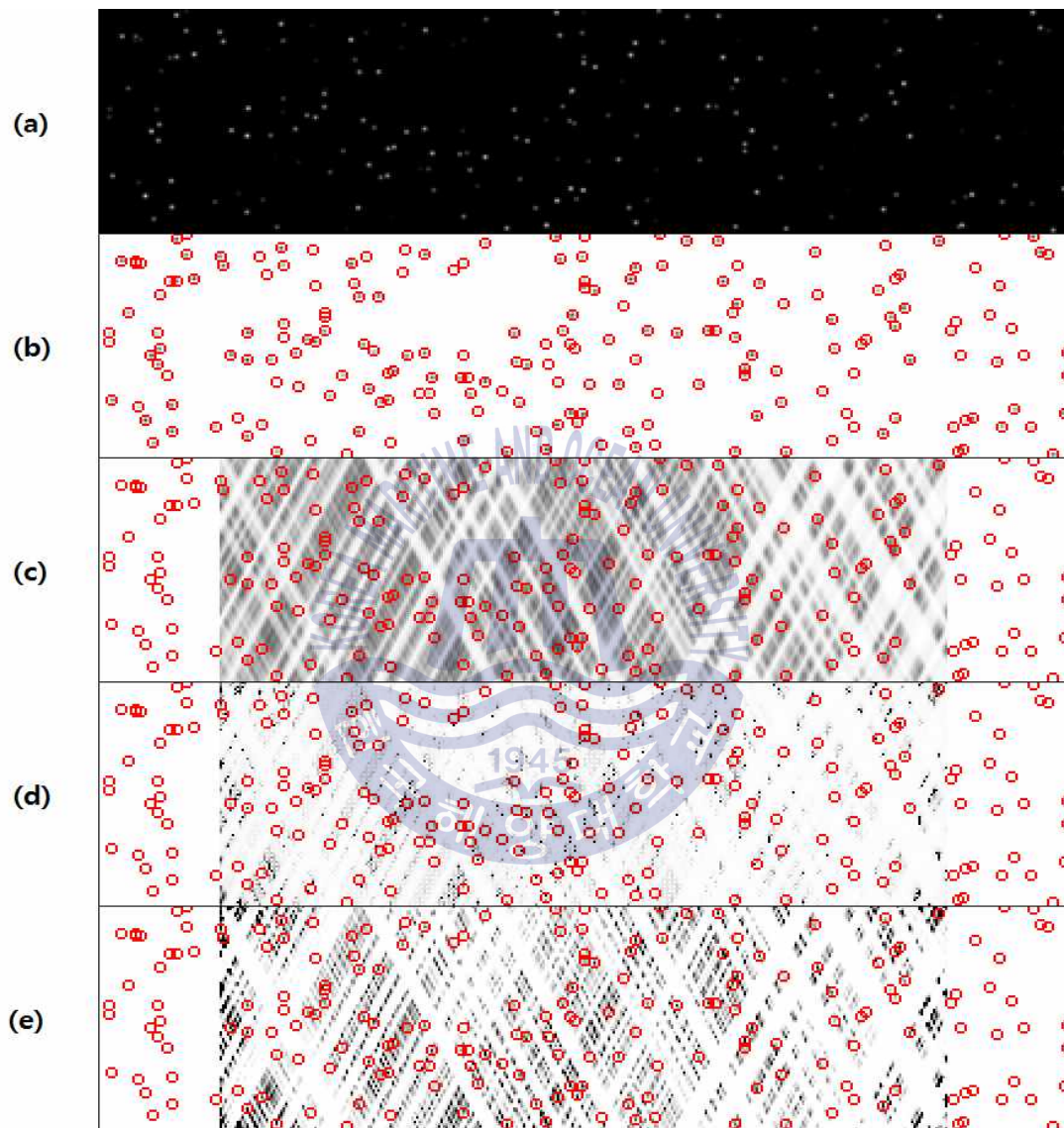


**Fig. 3.6** Camera angle : 30, Particle number : 50, Size : 1 Sigma : 1  
 (a) Original (b) Inverse original (c) MLOS (d) MART (e) SMART

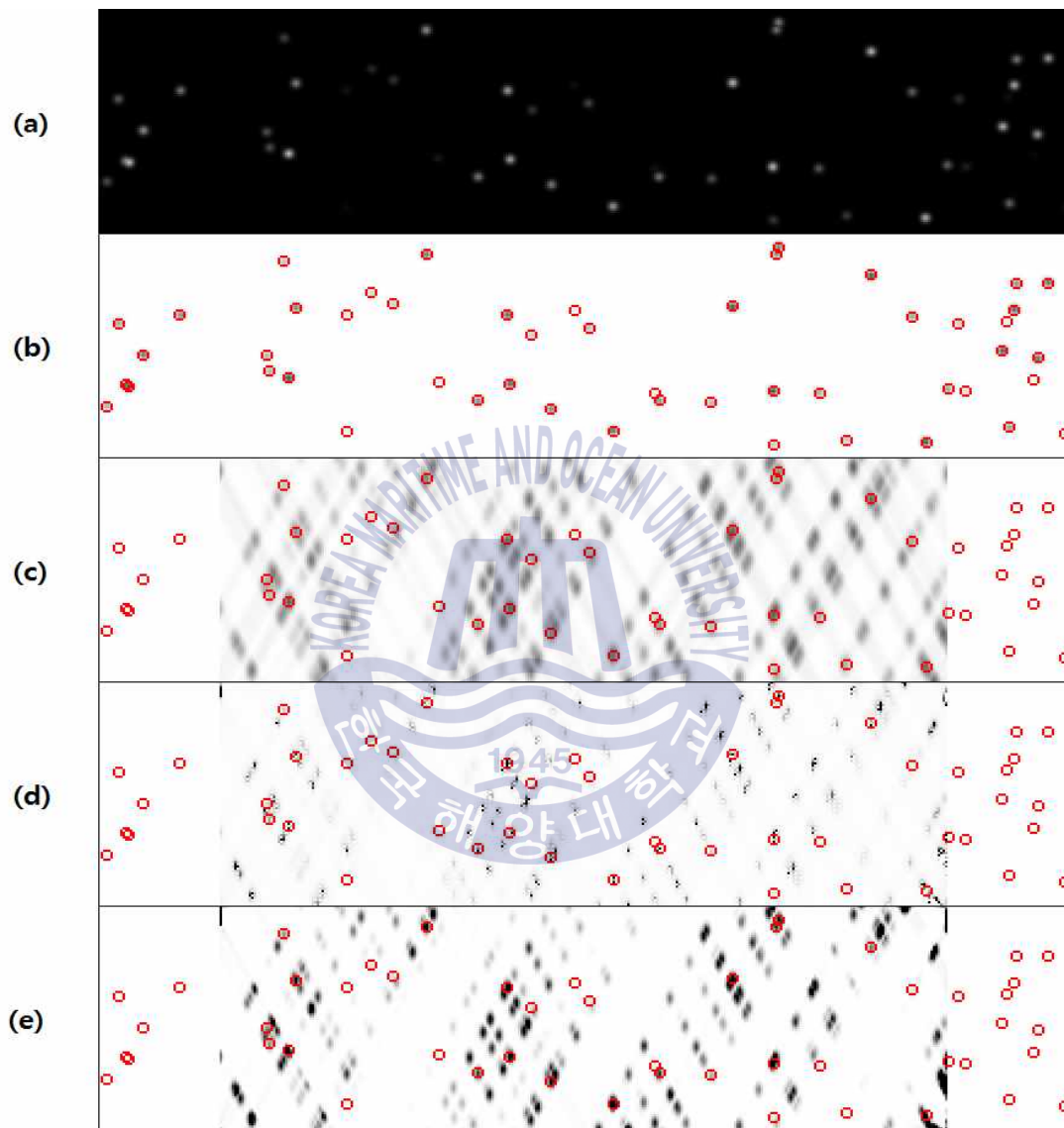


**Fig. 3.7** Camera angle : 30, Particle number : 100, Size : 1 Sigma : 1  
 (a) Original (b) Inverse original (c) MLOS (d) MART (e) SMART



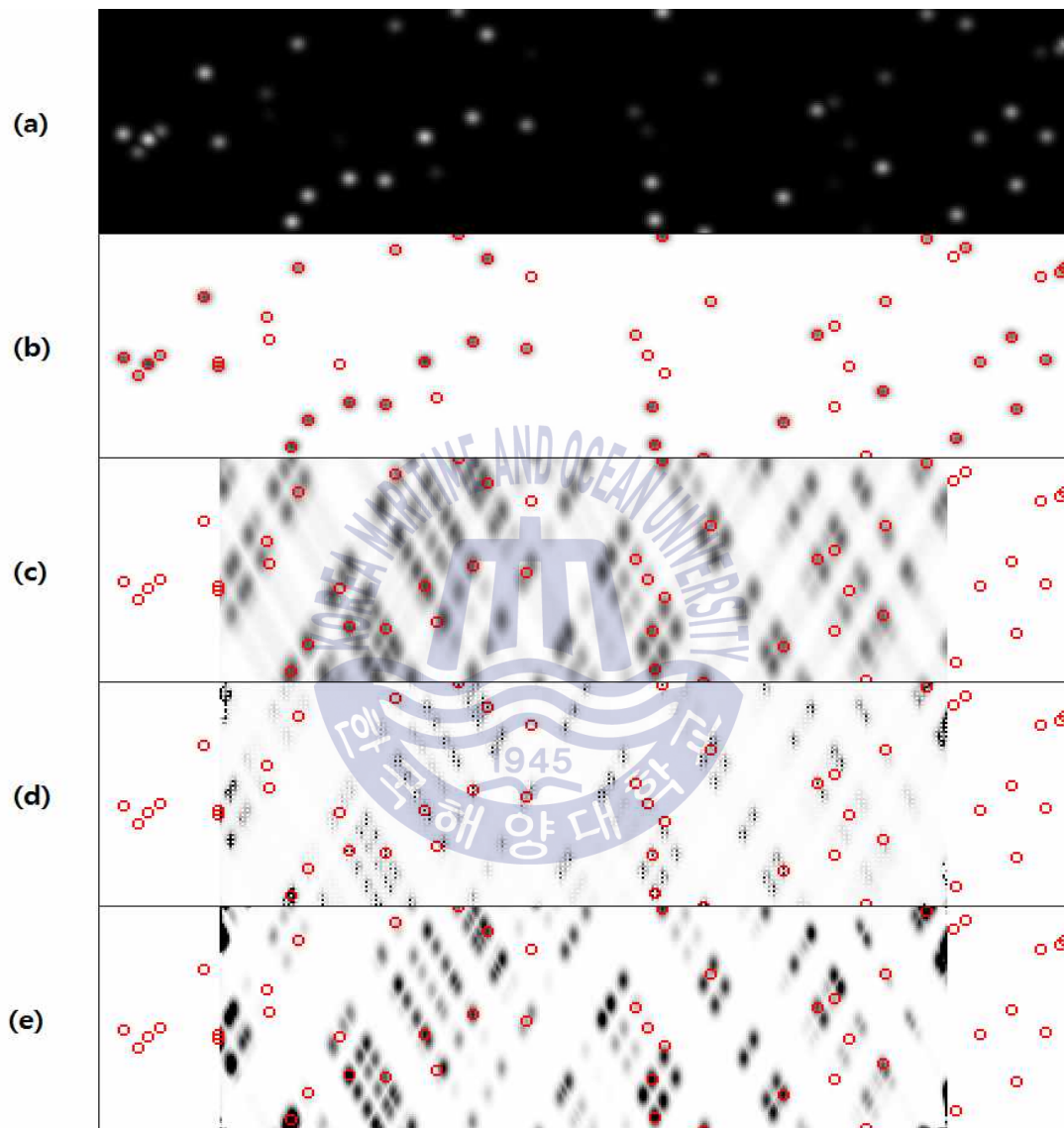


**Fig. 3.8** Camera angle : 30, Particle number : 200, Size : 1 Sigma : 1  
 (a) Original (b) Inverse original (c) MLOS (d) MART (e) SMART



**Fig. 3.9** Camera angle : 30, Particle number : 50, Size : 3 Sigma : 2  
 (a) Original (b) Inverse original (c) MLOS (d) MART (e) SMART





**Fig. 3.10** Camera angle : 30, Particle number : 50, Size : 5 Sigma : 3  
 (a) Original (b) Inverse original (c) MLOS (d) MART (e) SMART

가상영상을 비교하였을 때 MART와 SMART는 MLOS에 의하여 재구성된 복셀영상의 입자강도(intensity)가 비교적 높은 곳을 강조하는 효과를 내었다. 하지만 실제 입자위치가 아닌 지점에 많은 입자가 생성되었고 실제 입자위치에 입자가 없는 경우도 생겼다.

Fig. 3.4, Fig. 3.5, Fig. 3.6과 같이 카메라 각도에 따른 재구성 결과를 비교해볼 때 카메라 각도가 작을수록 SMART법에서는 입자가 한쪽 방향으로 쪼개지는 형태로 재구성 된다.

Fig. 3.6, Fig. 3.7, Fig. 3.8과 같이 입자의 수에 따른 재구성 결과를 비교해 볼 때 MART와 SMART법의 특징인 강도 높은 지점들을 강조하는 효과로 인해 입자 수가 증가 할수록 가상 입자(Ghost Particle)의 상대적 비율이 증가함을 확인 할 수 있다.

Fig. 3.6, Fig. 3.9, Fig. 3.10과 같이 입자의 크기에 따른 재구성 결과를 비교해 볼 때 입자의 크기가 커질수록 MART법은 입자를 분해시키는 효과를 나타낸다.

MART와 SMART는 반복계산을 통해 실제 입자의 밝기에 비해 현저히 작아짐을 볼 수 있고 이는 MART와 SMART의 알고리즘에 새로운 기법이 필요함을 알 수 있다. 현재 제시되는 Tomo-PIV에서는 MLOS 기법만 이용하는 것이 적합하다 할 수 있다.

## 제4장 유동장 해석 적용

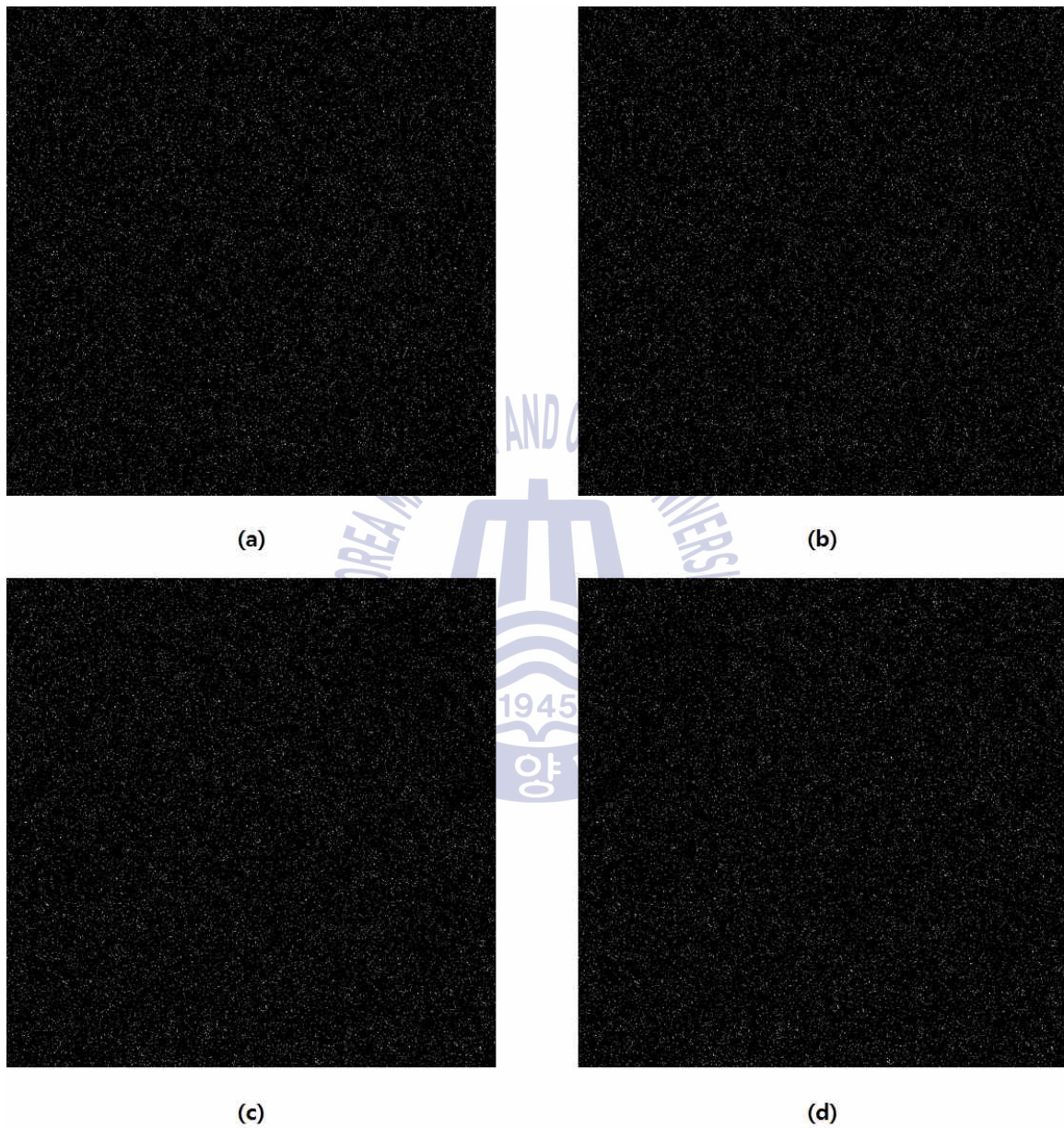
### 4.1 가상 유동 영상 제작

Tomo-PIV의 정량적 평가를 위한 가상영상은 3차원 형상의 링와(vortex ring) 유동을 선택하였고 입자 수를 5,000개 / 10,000개 / 20,000개 / 50,000개 / 100,000개와 같이 5가지 경우로 나누었다. 이때 시간 간격은 1/500초이며 각 100쌍을 만들어 평가를 진행하였다.

링와는  $z = 0\text{mm}$ 에 중심선이 위치하며, 직경은 10mm이다. 식(4.1)의  $d$ 를 통해 변위장 분석을 하였고  $R$ 은 링와의 센터에서부터의 링(ring)의 중심까지의 거리,  $l$ 은 와(vortex)의 길이 스케일을 나타내며 2mm로 설정하였다.

$$d = \left\| \begin{matrix} u \\ v \\ w \end{matrix} \right\| = \frac{8R}{l} e^{-\left(\frac{R}{l}\right)} \quad (4.1)$$

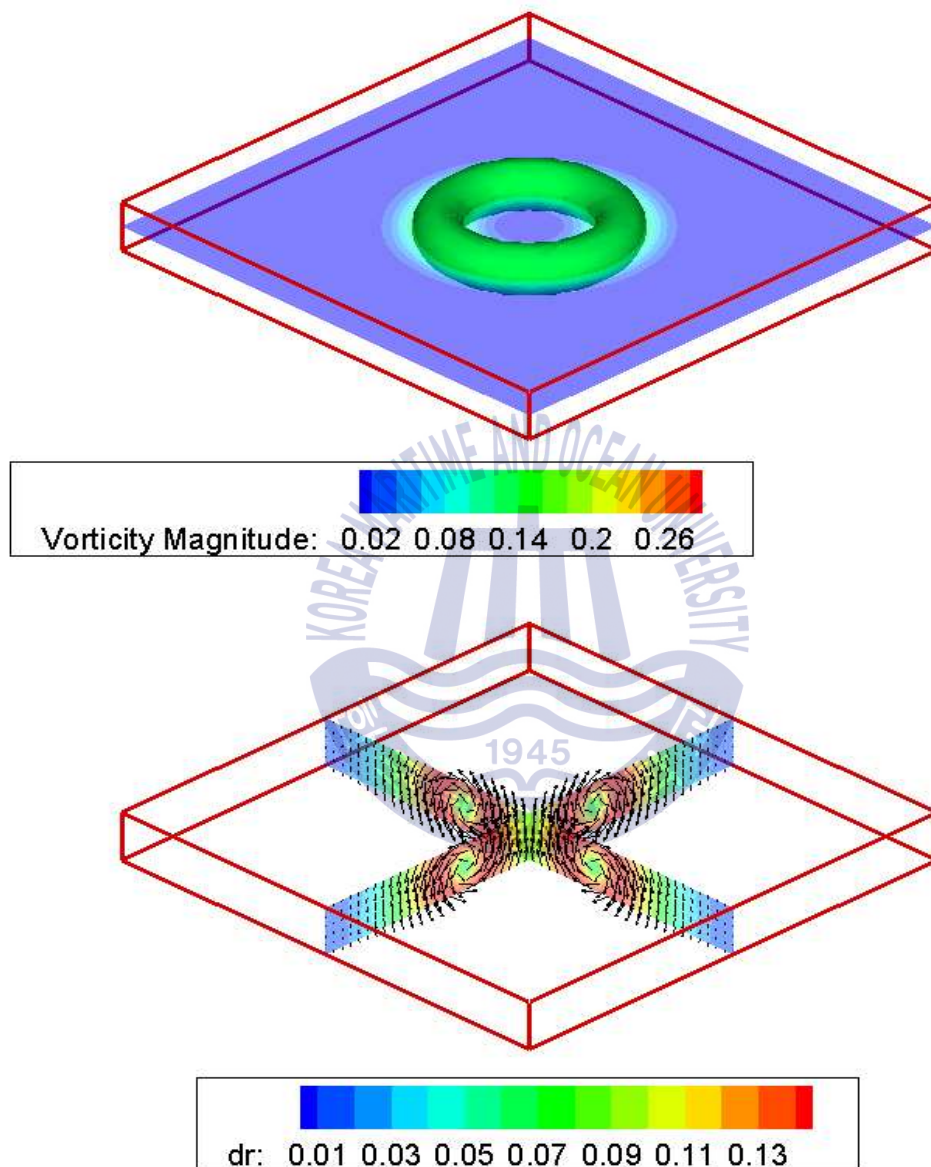
Fig. 4.1 는 입자수가 100,000개인 영상에서 이동량이 0.05mm, 0.20mm인 영상의 한쌍이다. Fig. 4.2 ~ Fig. 4.5는 이동량 0.05mm, 0.10mm, 0.15mm, 0.20mm의 가상 유동에 대한 와도(vorticity) 및 속도에 대한 그래프이다.



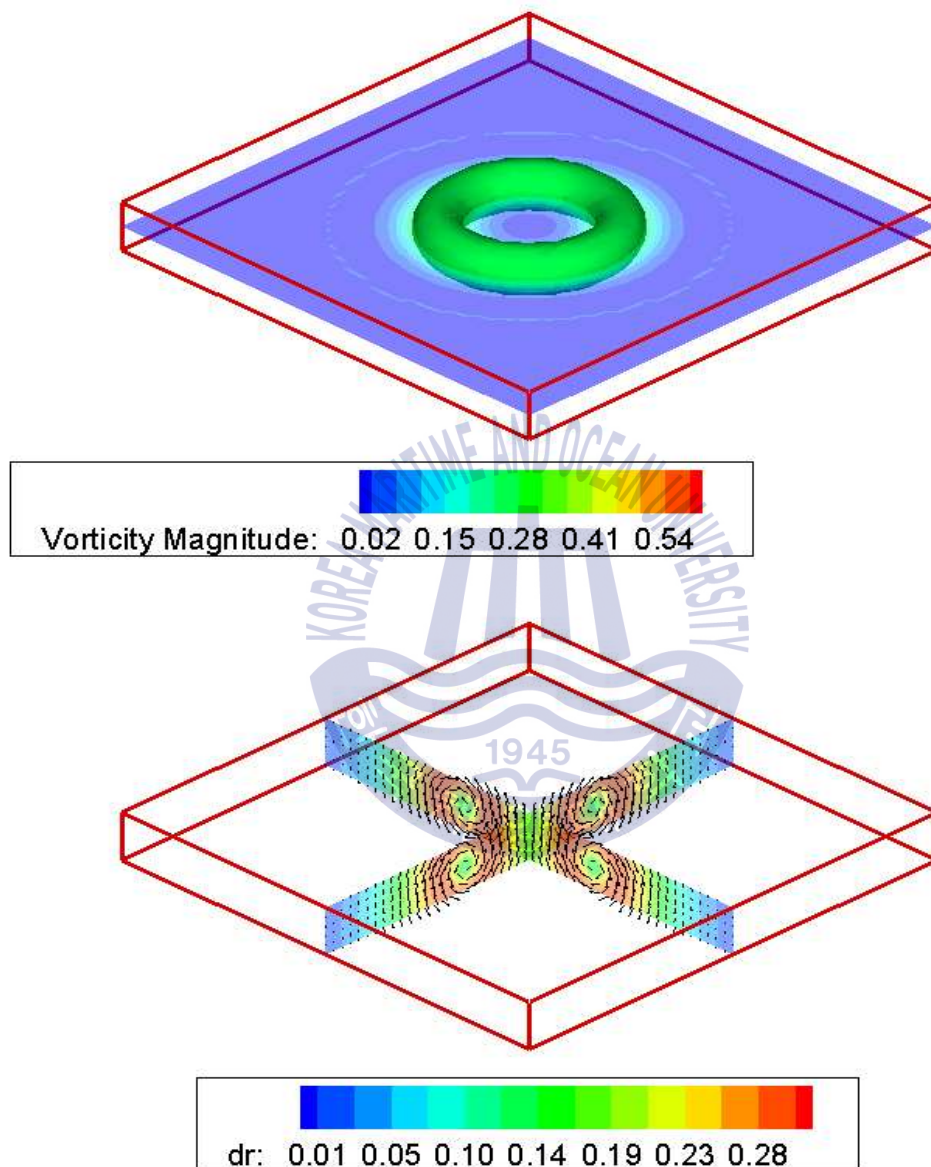
**Fig. 4.1** Particle density (Number=100,000)

(a) displacement=0.05mm before (b) displacement=0.05mm after  
(c) displacement=0.20mm before (d) displacement=0.20mm after

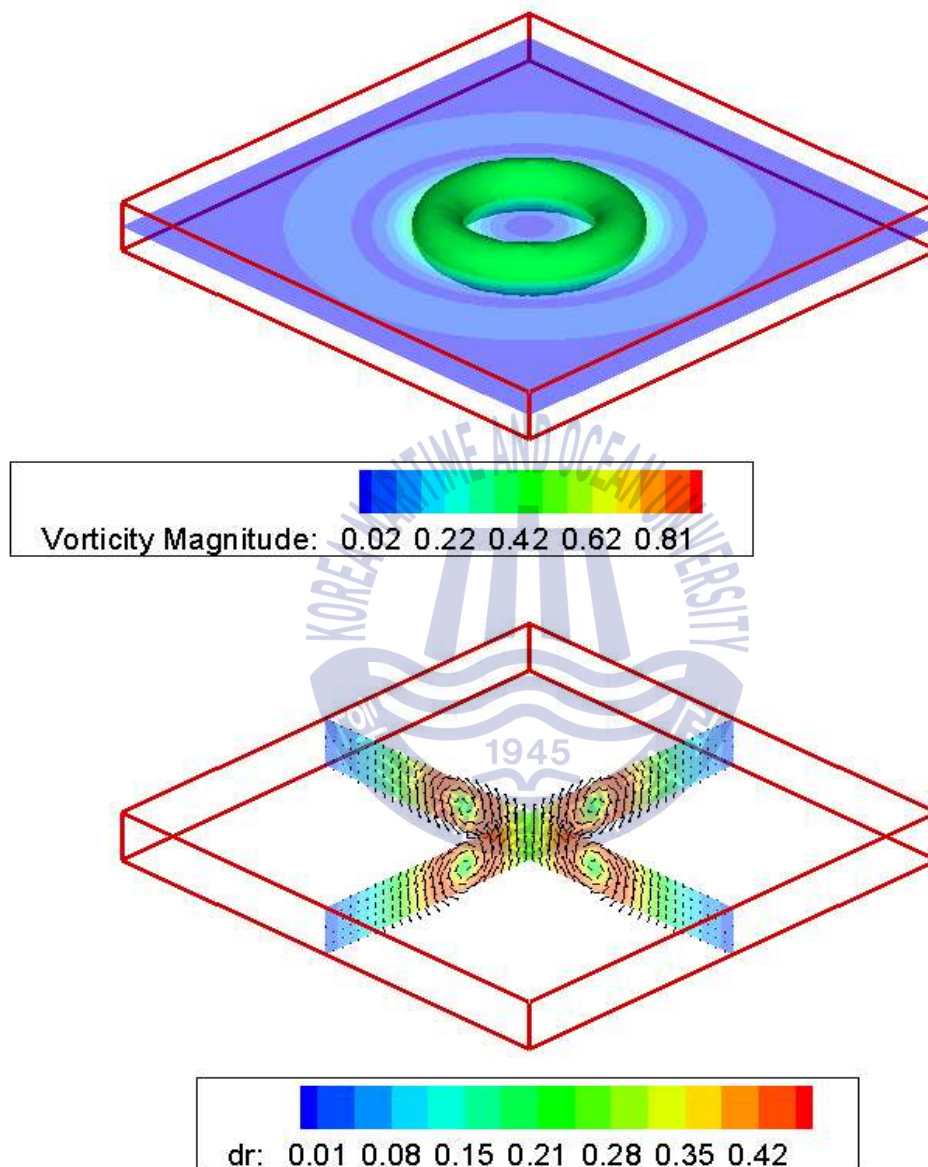




**Fig. 4.2** Spatial vorticity of 0.125 with velocity distribution(displacement=0.05mm)



**Fig. 4.3** Spatial vorticity of 0.250 with velocity distribution(displacement=0.10mm)



**Fig. 4.4** Spatial vorticity of 0.370 with velocity distribution(displacement=0.15mm)

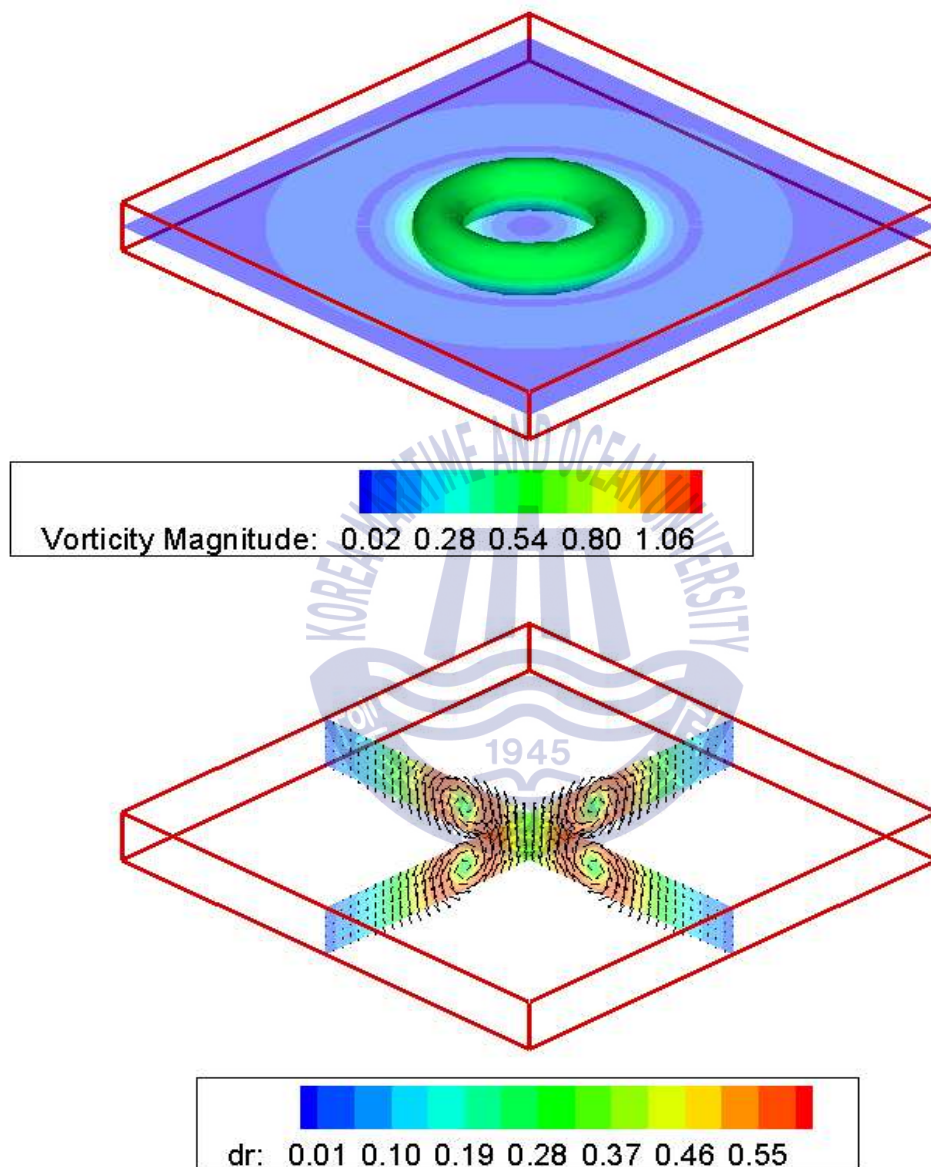


Fig. 4.5 Spatial vorticity of 0.500 with velocity distribution(displacement=0.20mm)



## 4.2 가상 유동 해석 결과

앞서 소개한 가상영상을 바탕으로 MLOS기법을 적용시켜 3차원 입자에 대하여 재구성하였다. Fig. 4.6은 재구성된 복셀영상에 대해서 속도장을 계산하는 과정에 대한 모식도이다. 연속되는 복셀에 대해 각 해석격자의 window복셀을 식(4.2), 식 (4.3)를 통하여 3차원 이산 푸리에변환(F. ScaranoM. L. Riethmuller; 1999)을 실시하여 주파수 영역대의 값으로 변환하였다.

$$f(x, y, z) = \sum_{u=0}^{W-1} \sum_{v=0}^{H-1} \sum_{w=0}^{D-1} F(u, v, w) e^{j2\pi(\frac{ux}{W} + \frac{vy}{H} + \frac{wz}{D})} \quad (4.2)$$

$$F(u, v, w) = \frac{1}{WHD} \sum_{x=0}^{W-1} \sum_{y=0}^{H-1} \sum_{z=0}^{D-1} f(x, y, z) e^{-j2\pi(\frac{ux}{W} + \frac{vy}{H} + \frac{wz}{D})} \quad (4.3)$$

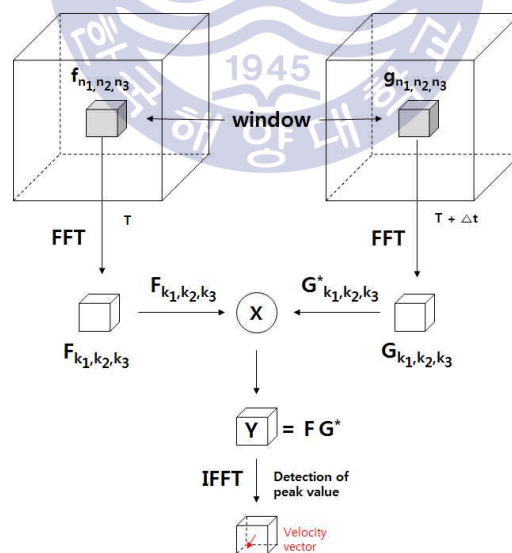
$W, H, D$  : 복셀 영상의 크기

2개의 변환된 복셀영상에 대해 complex-conjugate multiply를 실시하였다. 결과로 나오는 복셀영상에 대해서 IFFT(F. ScaranoM. L. Riethmuller; 1999)를 실시하고 이때 피크 값을 추출하고 그 위치로 향하는 벡터(vector)를 최종 속도벡터로 정하였다. Fig. 4.7는 Tomo-PIV 계산과정의 개

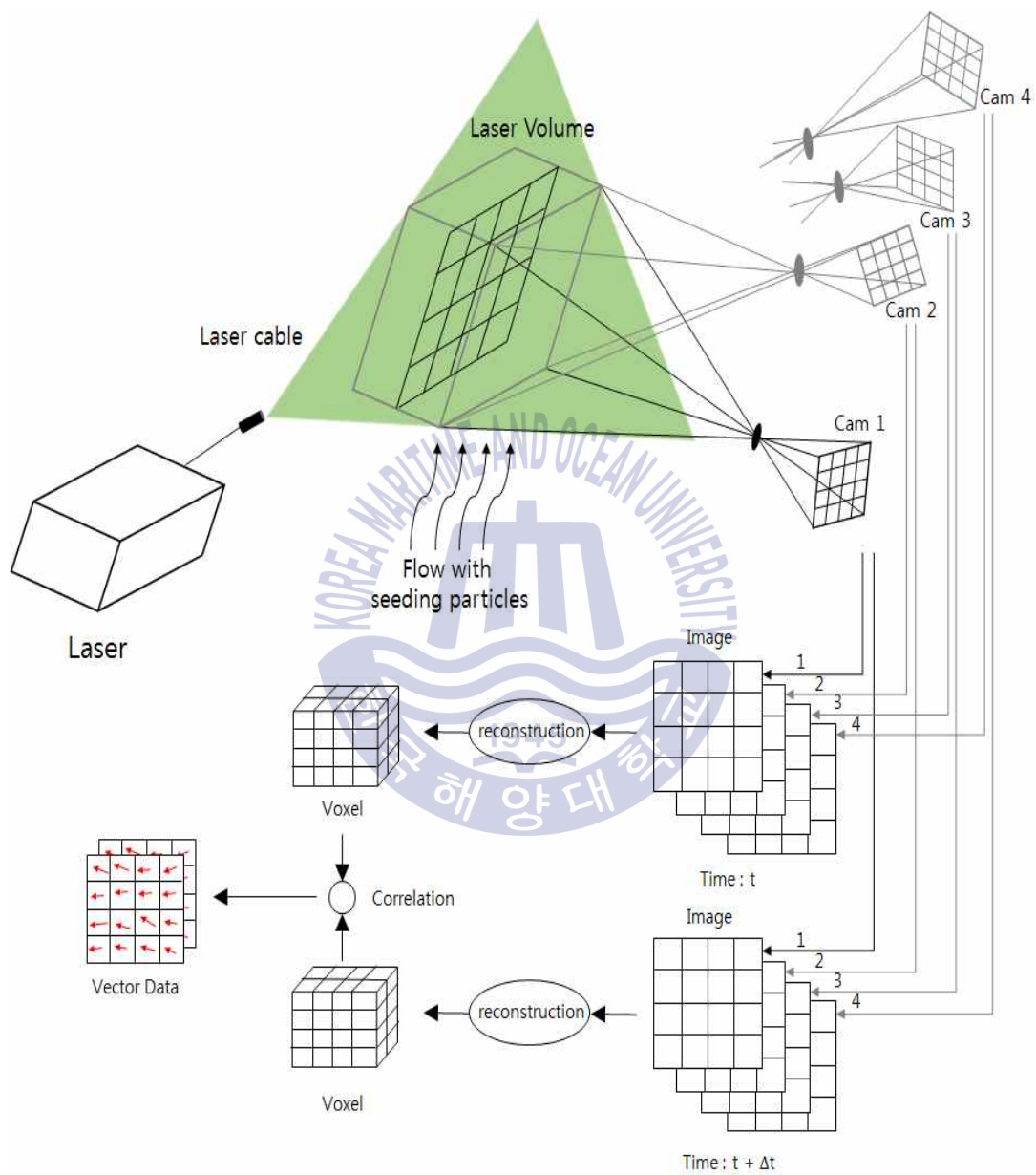
략도를 나타낸다. Fig. 4.8 ~ Fig. 4.16은 이와 같은 과정을 통해 Table 4.1의 조건을 가진 가상영상을 해석 하였을 때의 평균 결과이다.

Case	Particle density	Move[mm]	Figure
1	50,000	0.05	Fig. 4.7
2	50,000	0.10	Fig. 4.8
3	50,000	0.15	Fig. 4.9
4	50,000	0.20	Fig. 4.10
5	5,000	0.15	Fig. 4.11
6	10,000	0.15	Fig. 4.12
7	20,000	0.15	Fig. 4.13
8	50,000	0.15	Fig. 4.14
9	100,000	0.15	Fig. 4.15

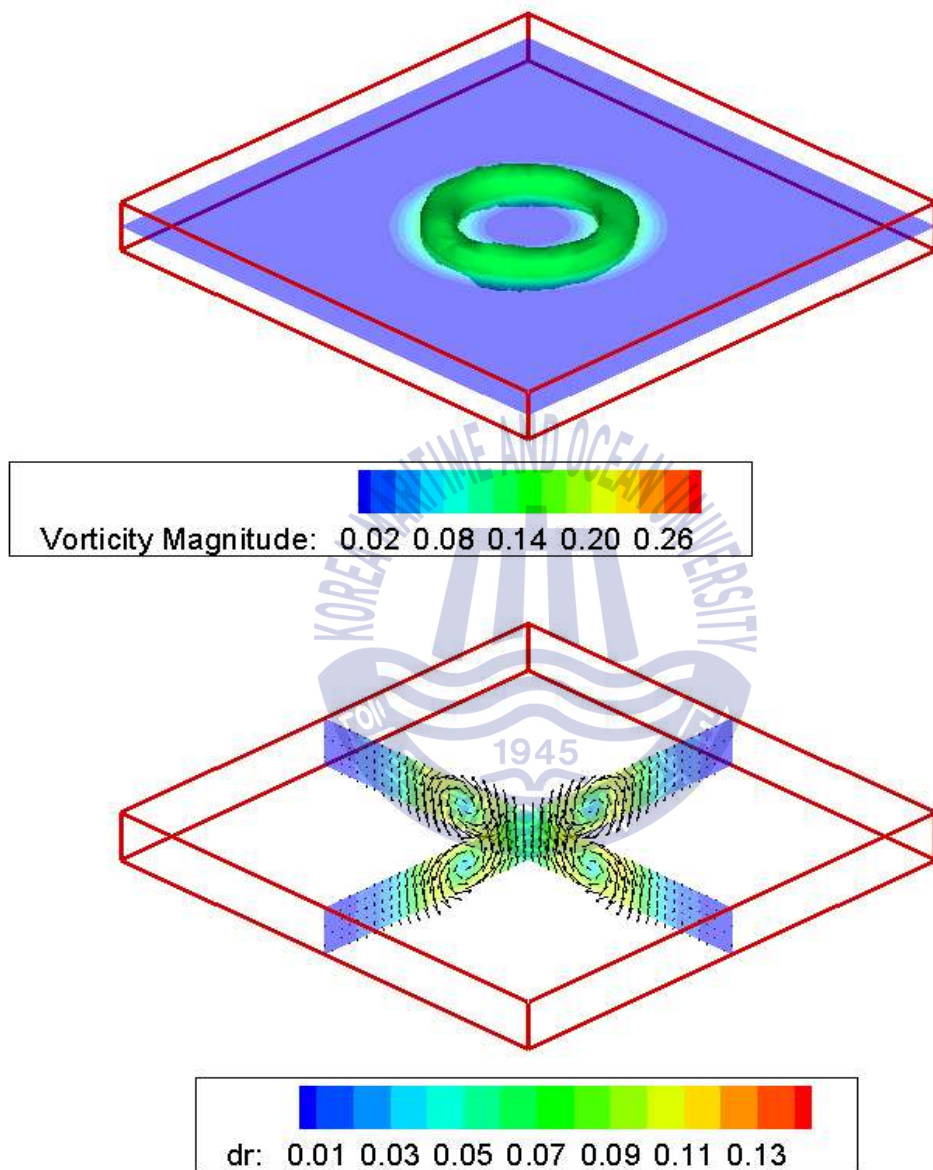
**Table 4.1** Condition of virtual image



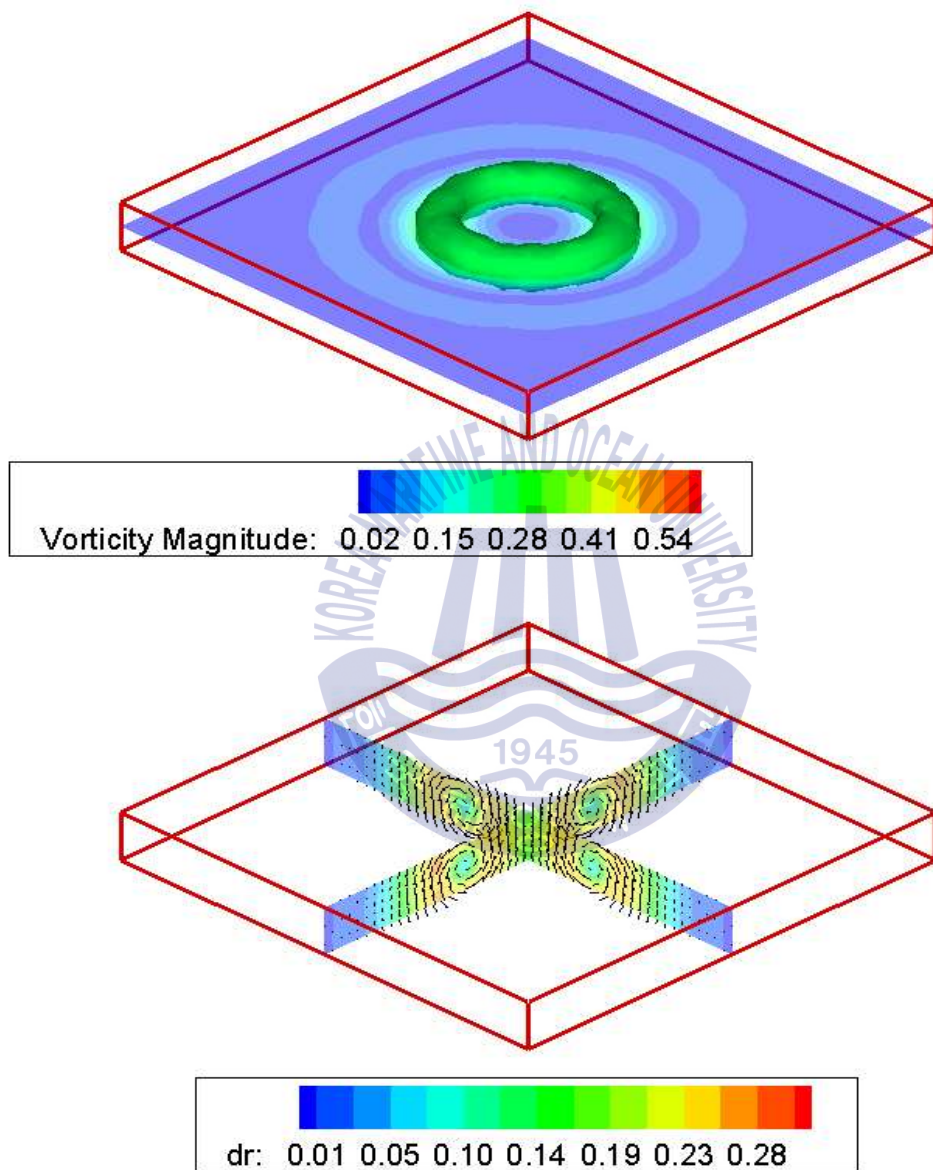
**Fig. 4.6** Schematic of 3D PIV calculations



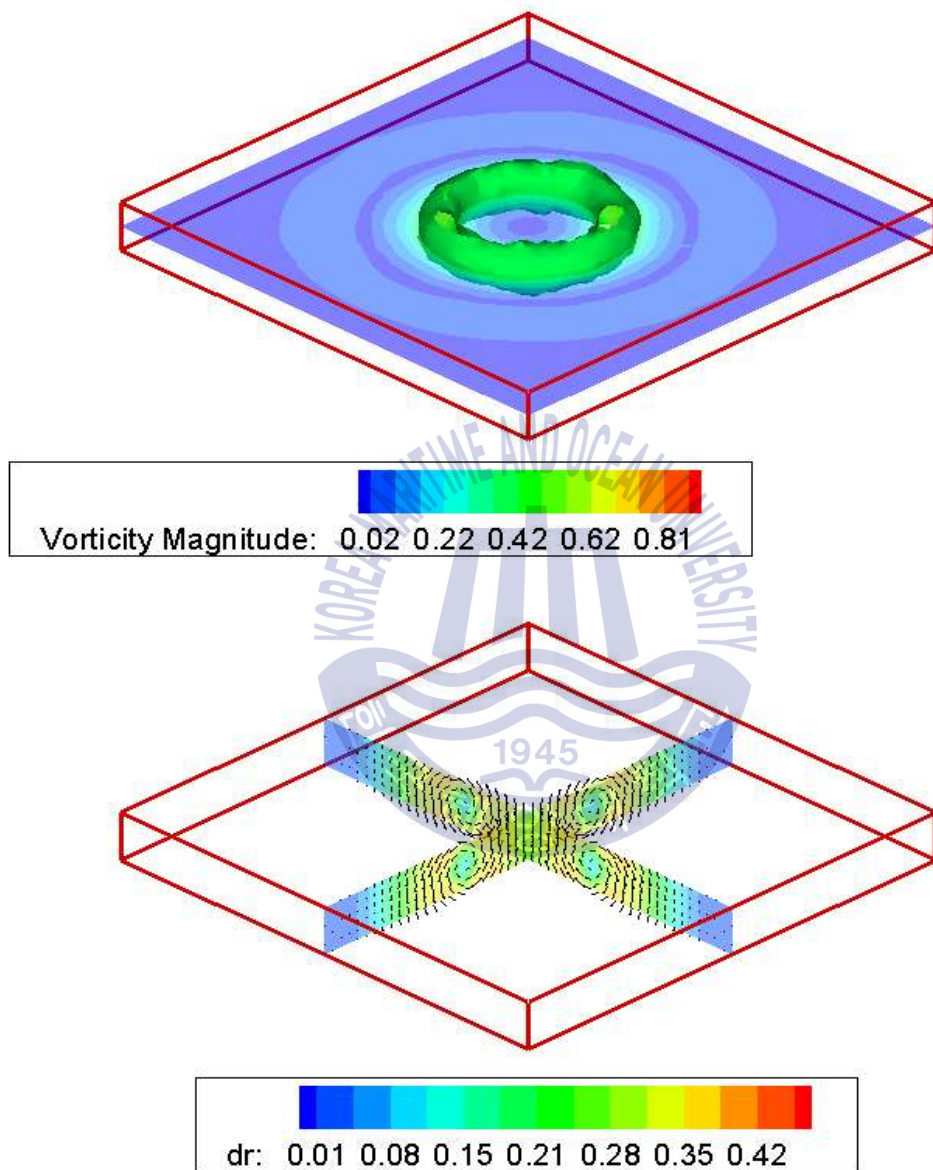
**Fig. 4.7** Schematic of Tomographic PIV process



**Fig. 4.8** Spatial vorticity of 0.125 with velocity distribution  
(displacement=0.05mm, number=50,000)

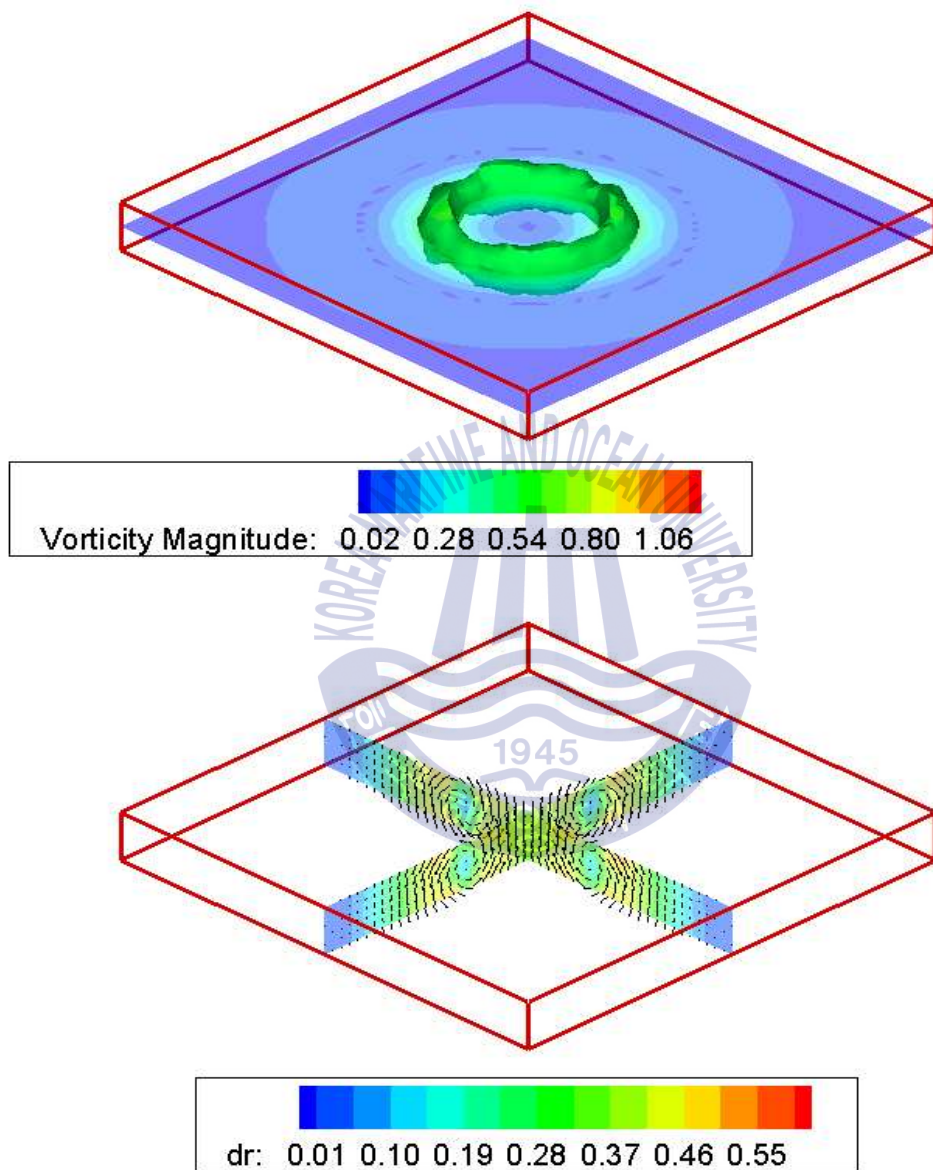


**Fig. 4.9** Spatial vorticity of 0.250 with velocity distribution  
(displacement=0.10mm, number=50,000)

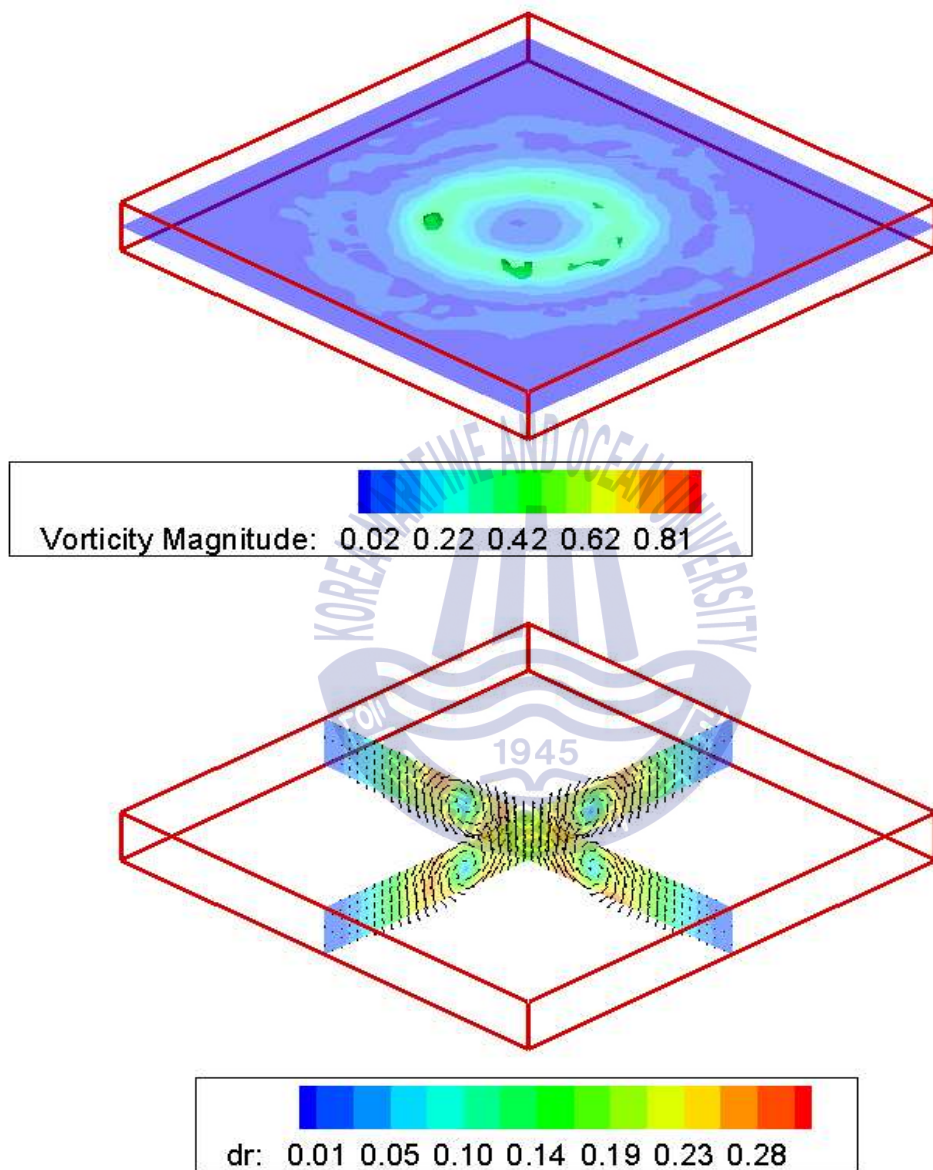


**Fig. 4.10** Spatial vorticity of 0.370 with velocity distribution  
(displacement=0.15mm, number=50,000)



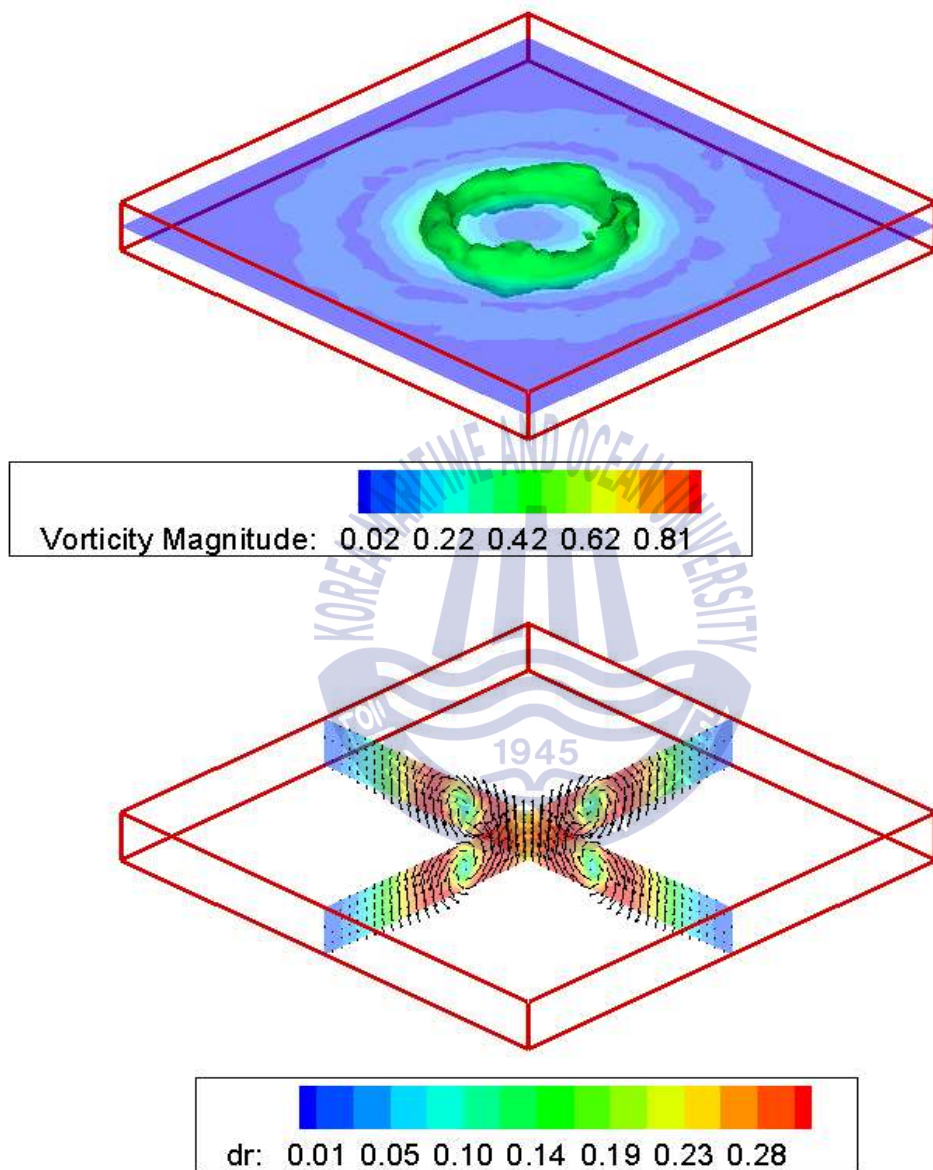


**Fig. 4.11** Spatial vorticity of 0.500 with velocity distribution  
(displacement=0.20mm, number=50,000)

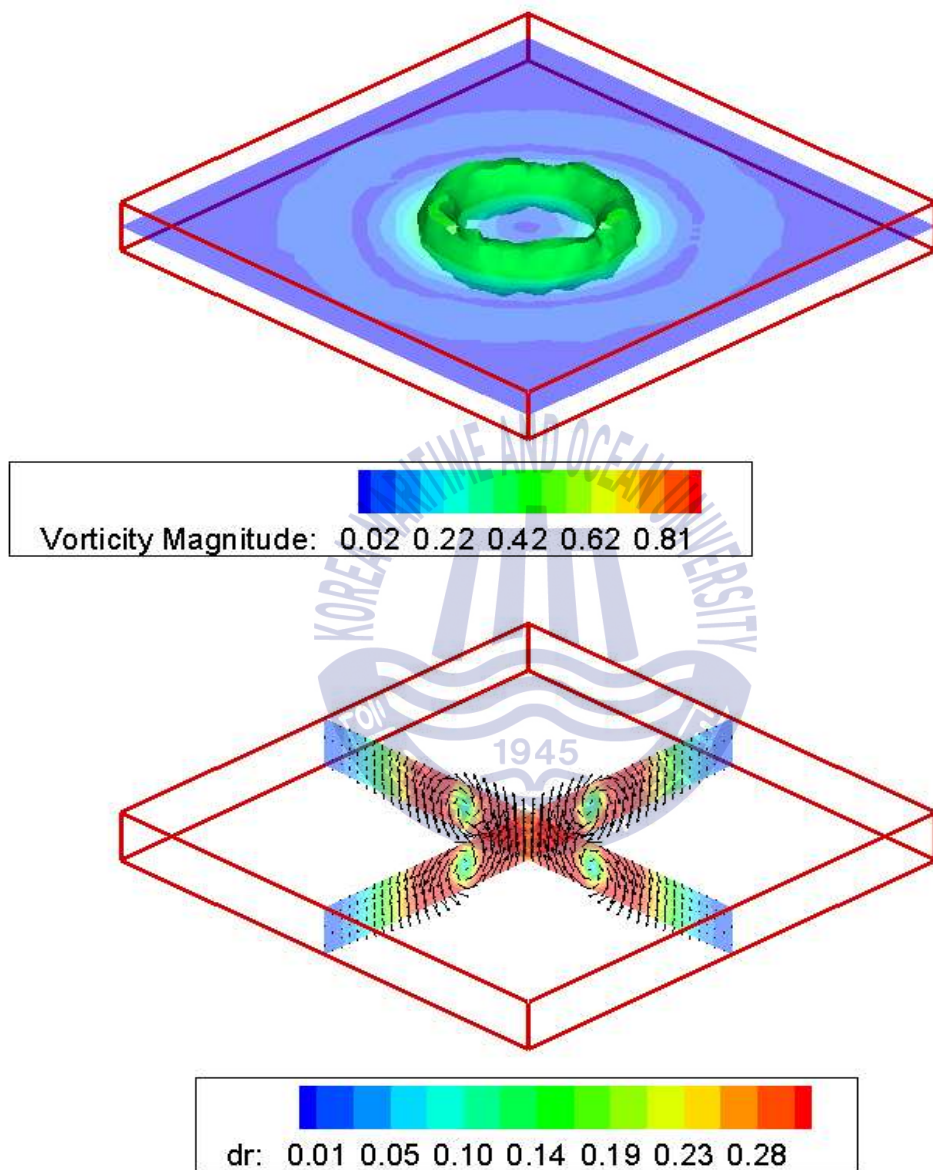


**Fig. 4.12** Spatial vorticity of 0.370 with velocity distribution (displacement=0.15mm, number=5,000)

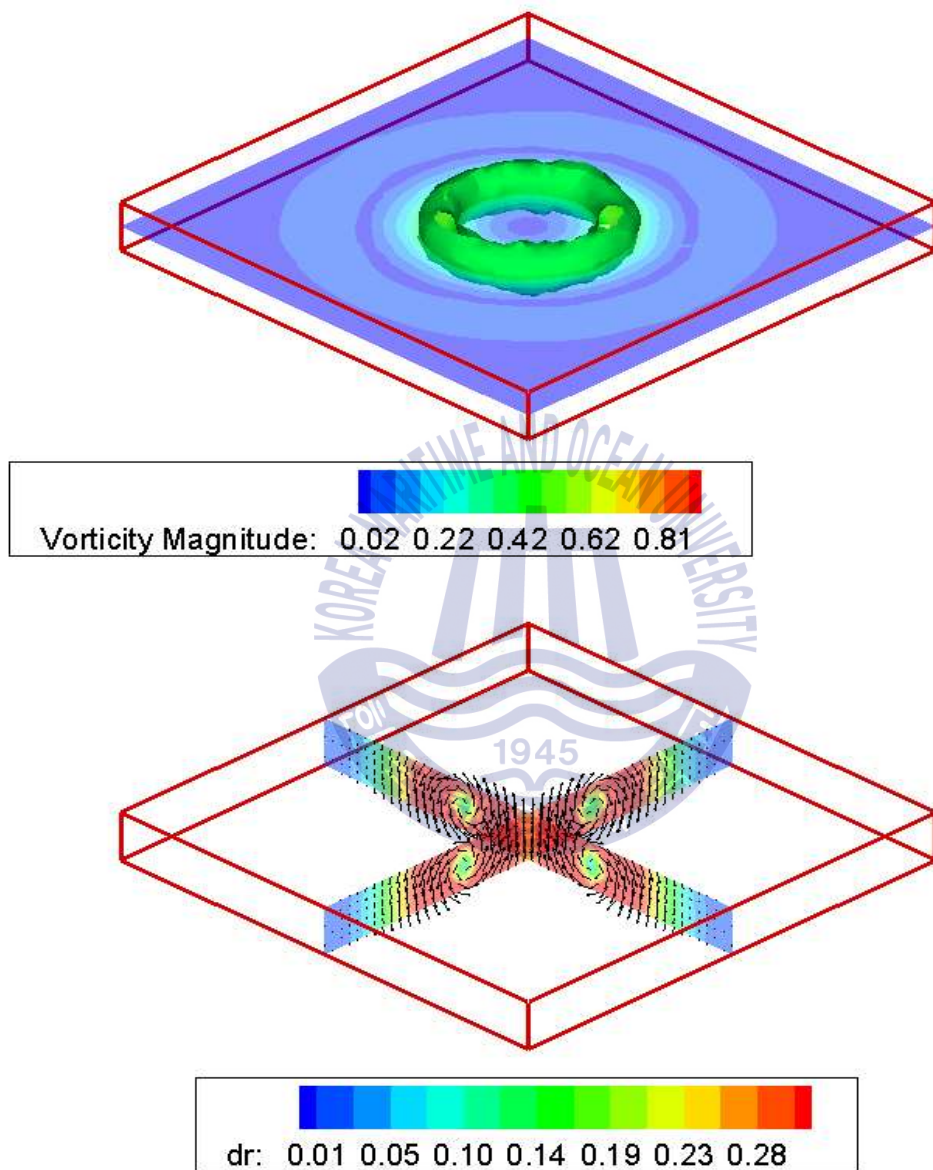




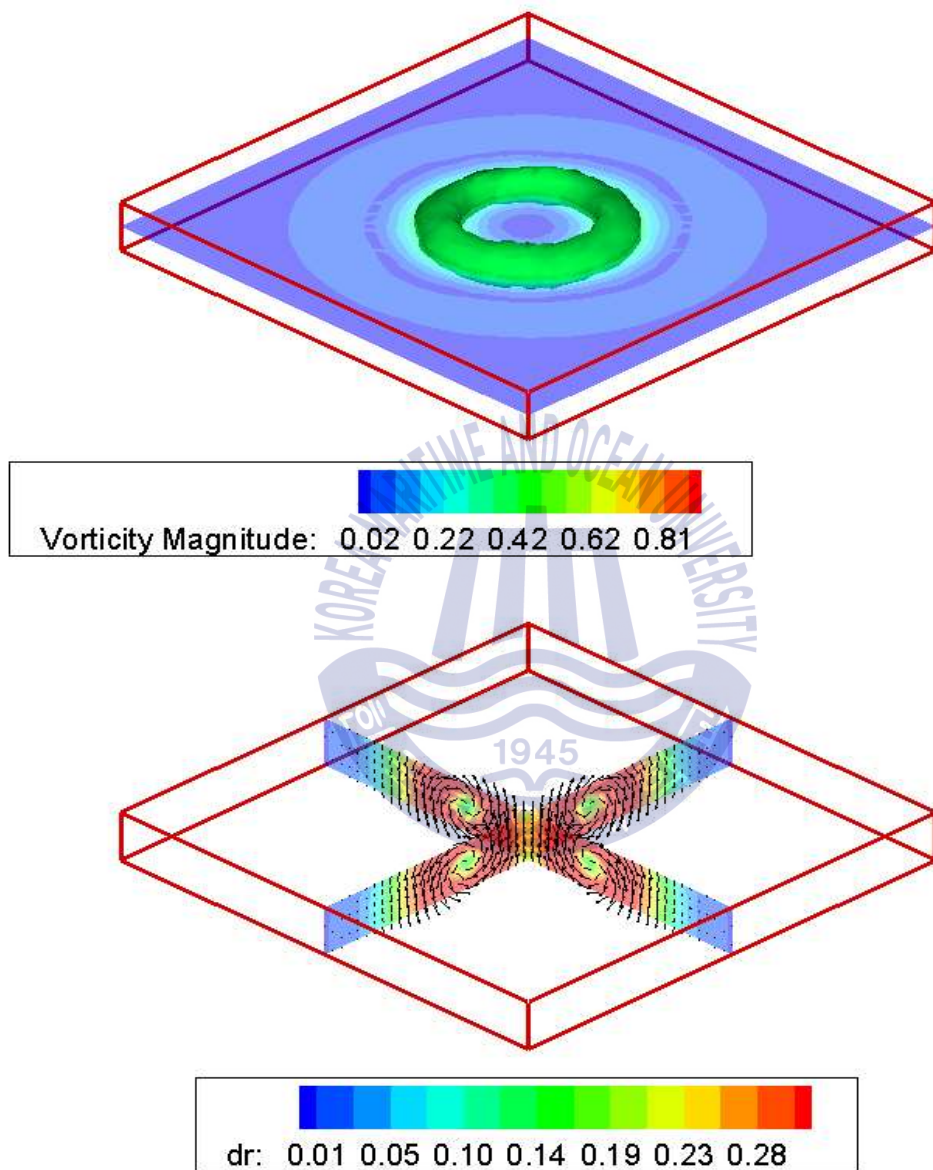
**Fig. 4.13** Spatial vorticity of 0.370 with velocity distribution  
(displacement=0.15mm, number=10,000)



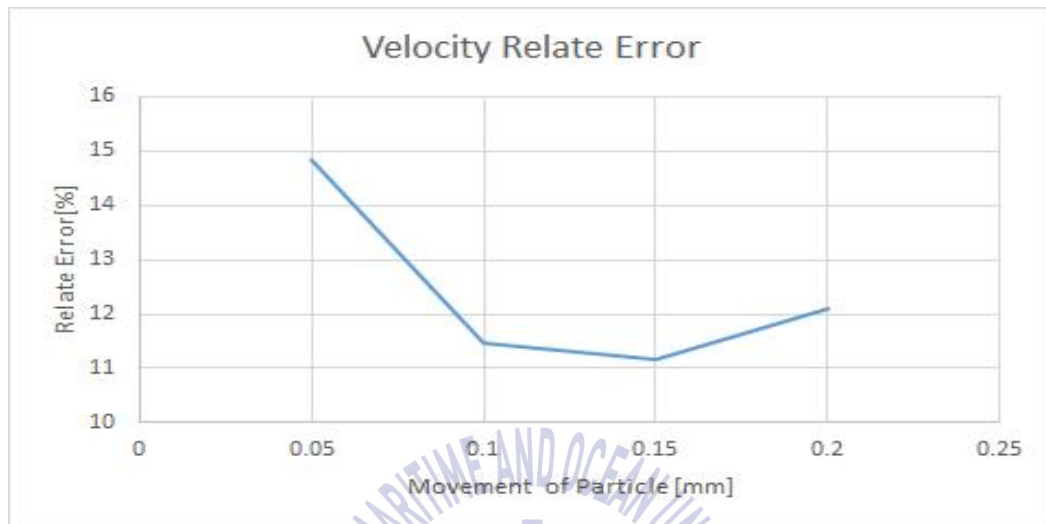
**Fig. 4.14** Spatial vorticity of 0.370 with velocity distribution  
(displacement=0.15mm, number=20,000)



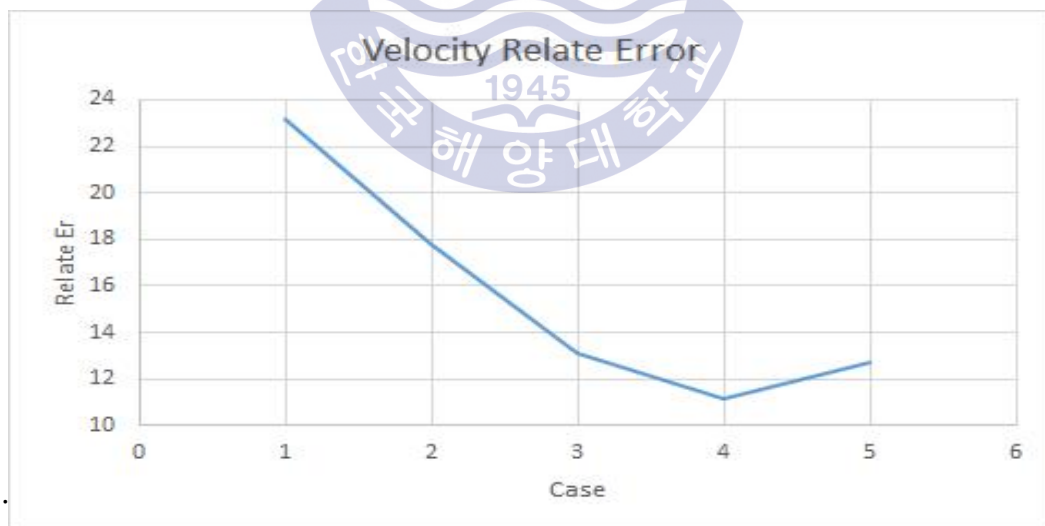
**Fig. 4.15** Spatial vorticity of 0.370 with velocity distribution  
(displacement=0.15mm, number=50,000)



**Fig. 4.16** Spatial vorticity of 0.370 with velocity distribution  
(displacement=0.15mm, number=100,000)



**Fig. 4.17** Case 1~4 velocity relate error



**Fig. 4.18** Case 5~9 velocity relate error



속도별 와도를 표현한 결과를 보면, 전체적으로 링(ring)형태의 모양이 나타나 있지만 계산결과가 평균값이기 때문에 가상의 값보다 상대적으로 낮은 값을 가짐을 알 수 있었다.

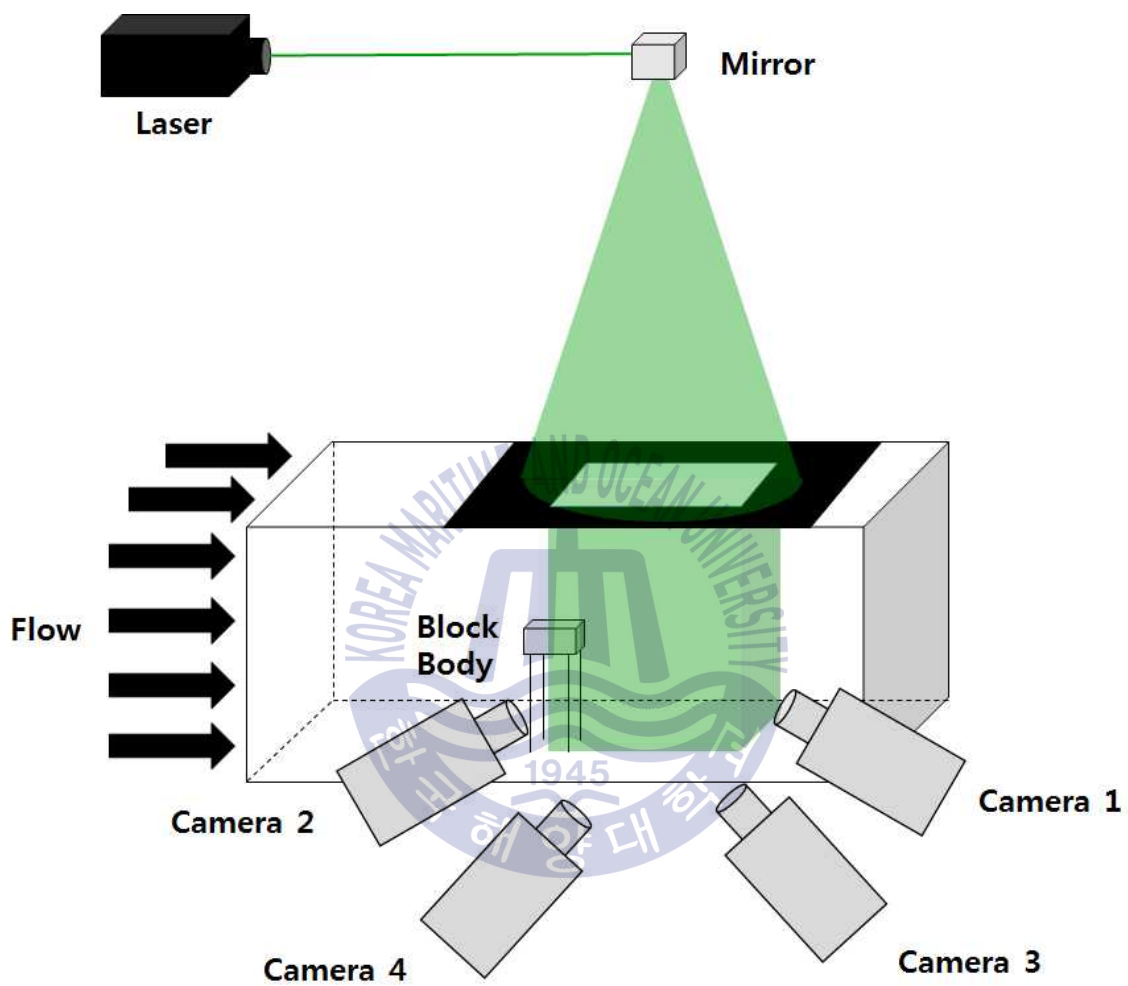
Fig. 4.17은 속도 값에 대한 오차율을 나타낸다. 입자 밀도에 따른 결과를 보았을 때 적정수준 이상의 입자 밀도를 가지지 못하면 링(ring)형태의 와도를 가지지 못하고 속도에 대한 오차도 크게 나타나게 됨을 알 수 있었다.

Fig. 4.18은 밀도에 따른 속도 오차율을 나타내는데 전반적인 해석결과 오차율이 10% 이상의 값을 가짐을 알 수 있었다.



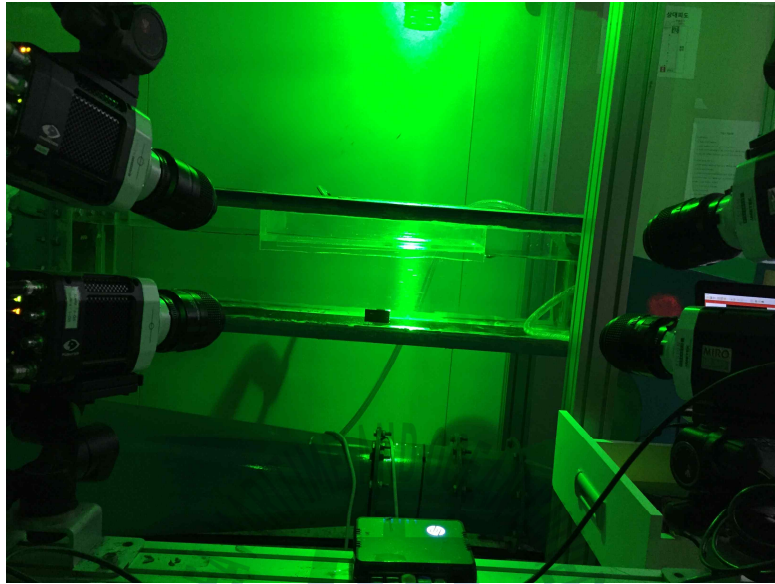
### 4.3 사각형 물수체 후류 유동장 실험장치

Fig. 4.19은 사각형 물수체 후류 계측을 위해서 적용된 시스템을 나타내고 있다. 계측시스템은 4대의 고속카메라(MIRO LAB 340), 레이저광원(Nd-Yag Laser, 8W, 532nm wavelength), 회류수조 및 사각형 물수체 등으로 구성하였다. 회류수조의 제원은  $300 \times 300 \times 1200 \text{ mm}^3$ 이며,  $30\text{mm} \times 30\text{mm} \times 50 \text{ mm}$ 의 사각형 물수체를 사용하였다. 입구로부터의 평균유속은  $0.12\text{m/s}$ 이며 사각형 물수체의 위치는 회류수조로부터 약 2/3 지점인 840mm이다. 영상의 해상도는  $1280 \times 720 \text{ pixel}$ 이며 촬영 속도는 200frame/s이다. 해석영역은 x축  $-45 \sim 50\text{mm}$ , y축  $-25 \sim 20\text{mm}$ , z축  $-25 \sim 25\text{mm}$  이고 Voxel 해상도는  $1188 \times 563 \times 625$  이며 해석 Grid는  $36 \times 16 \times 18$ 이다.

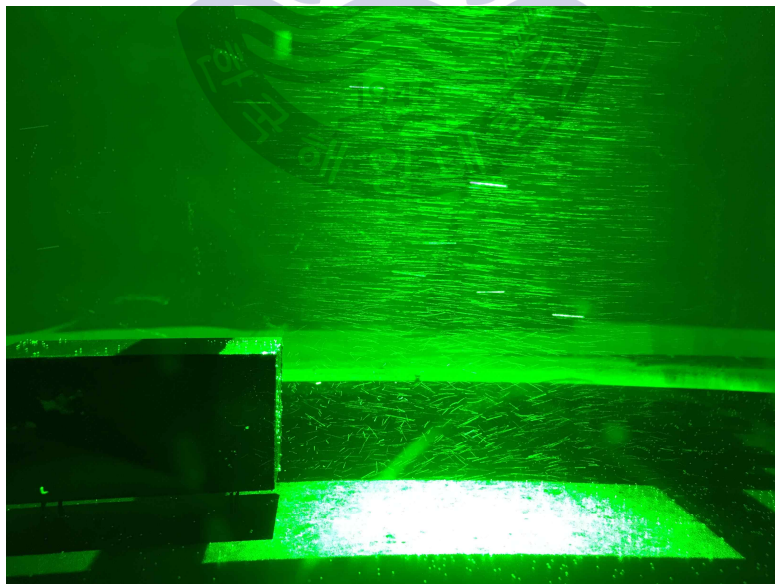


**Fig. 4.19** Experimental apparatus





**Fig. 4.20** 4-Camera system

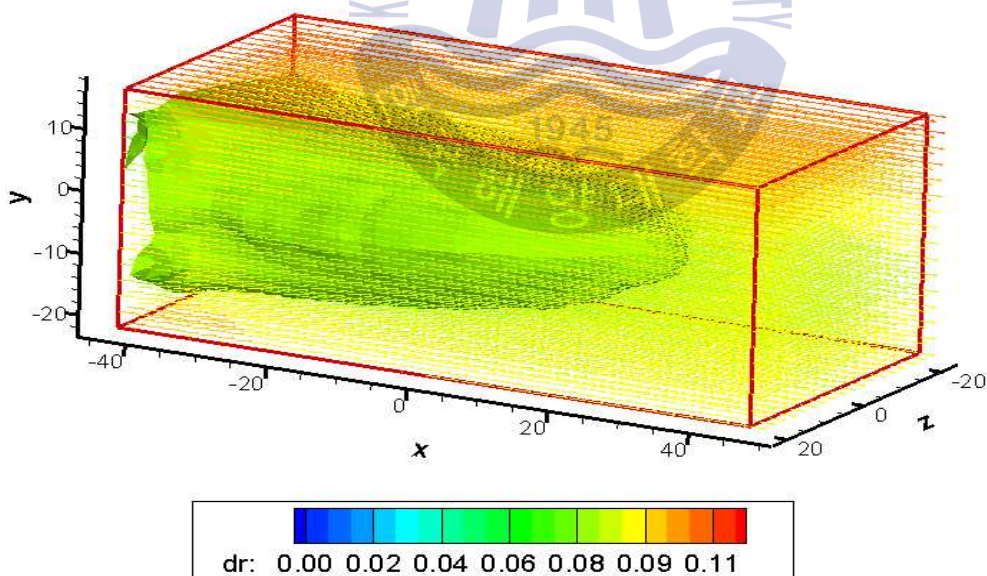


**Fig. 4.21** Area of experiment

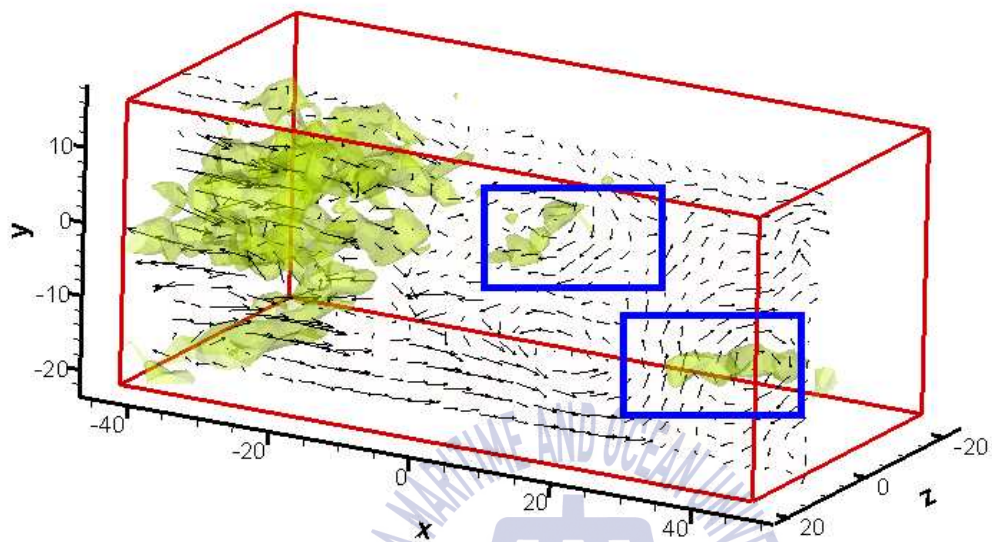
#### 4.4 사각형 물수체 후류 해석 결과

Fig. 4.21은 해석된 영상의 평균 유동장을 나타내며 0.08 m/s 에서의 등고면(iso-surface)을 나타낸다.

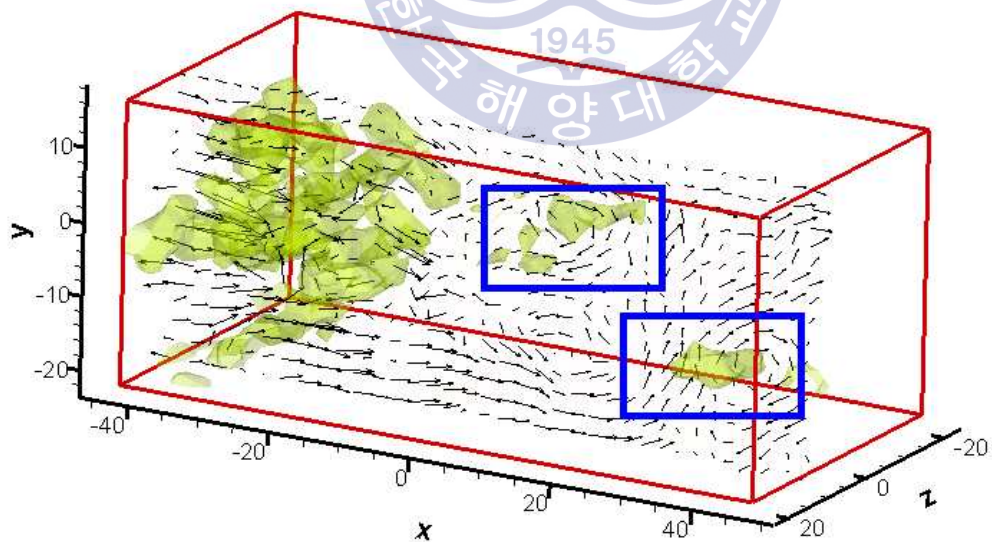
후류에 관한 벡터를 보기 위해 순시 유동장에서 평균 유동장 값을 벡터의 값으로 표현하였다. Fig. 4.22~ Fig. 4.31는 0.01초의 시간간격 간의 유동장이다. 등고면(iso-surface)는 Z방향 와도를 의미한다. 후류에서 와도를 볼 수 있으나 정확성이 낮게 보인다. 이는 복셀 재구성시 MLOS의 방법을 이용하여 낮은 정확성을 가지기 때문이다.



**Fig. 4.22** Time-mean vector field

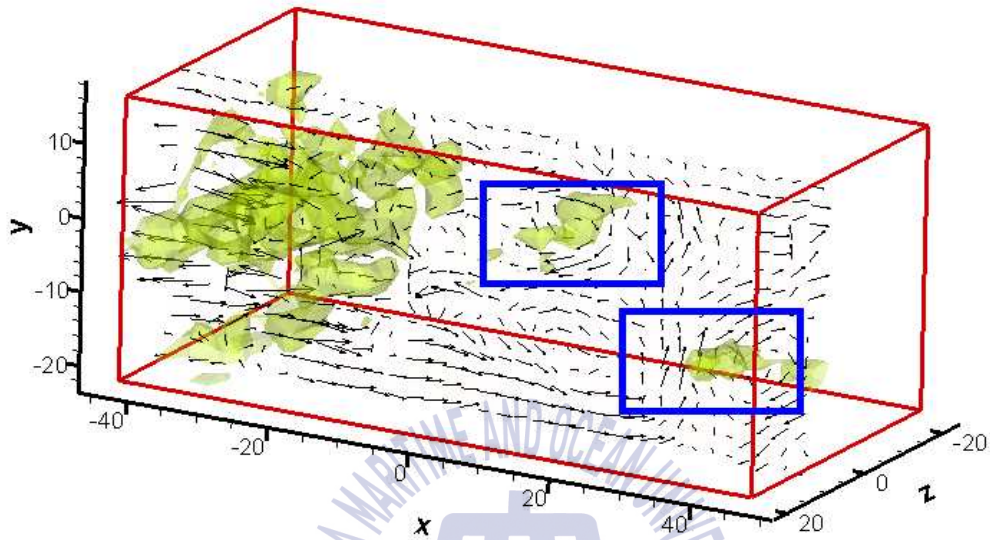


**Fig. 4.23** Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$  ,  $t = 0.00$ )

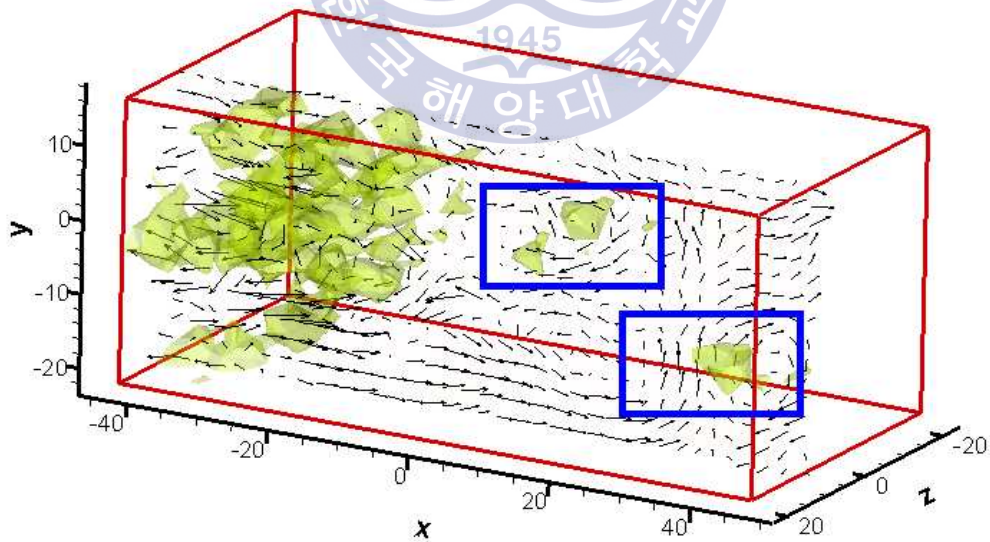


**Fig. 4.24** Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$  ,  $t = 0.01$ )

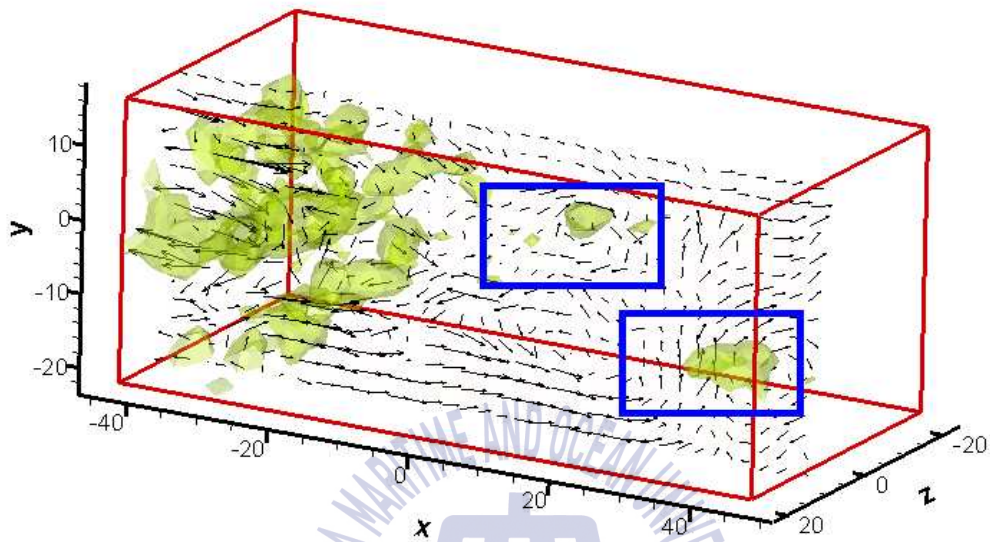




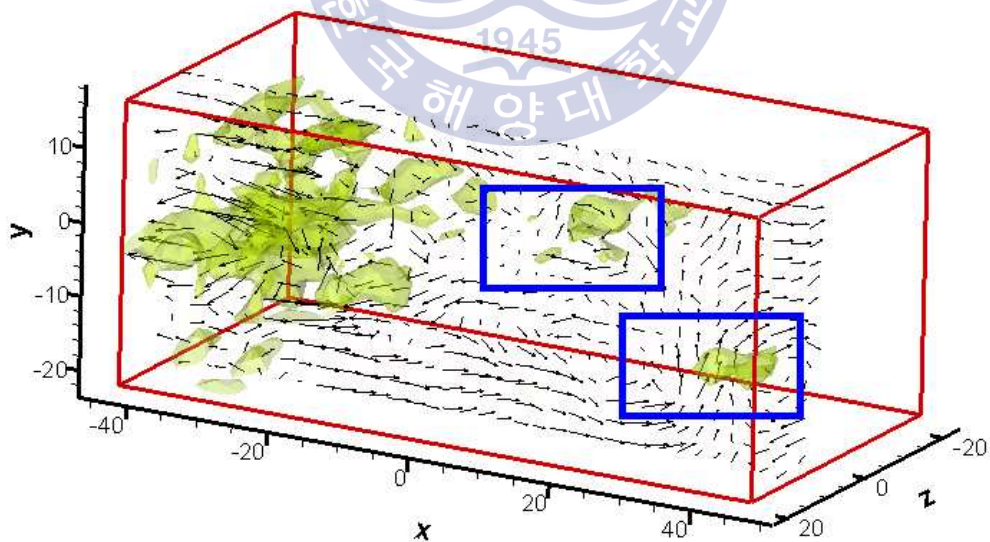
**Fig. 4.25** Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$  ,  $t = 0.02$ )



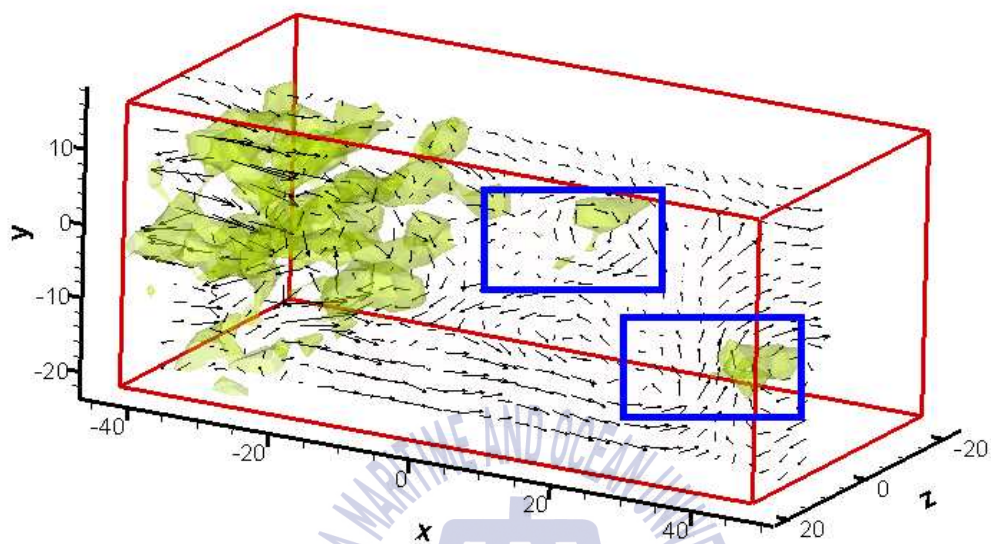
**Fig. 4.26** Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$  ,  $t = 0.03$ )



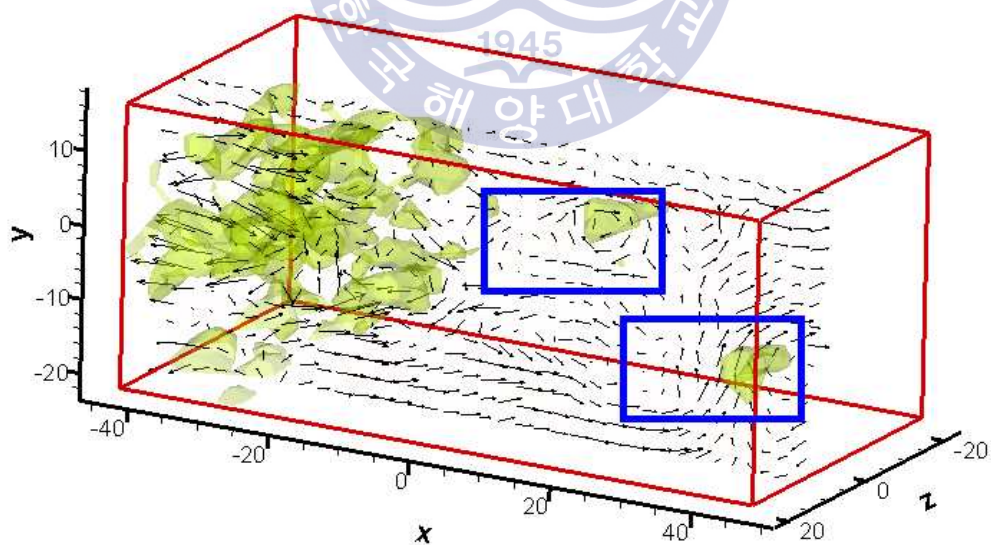
**Fig. 4.27** Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$  ,  $t = 0.04$ )



**Fig. 4.28** Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$  ,  $t = 0.05$ )

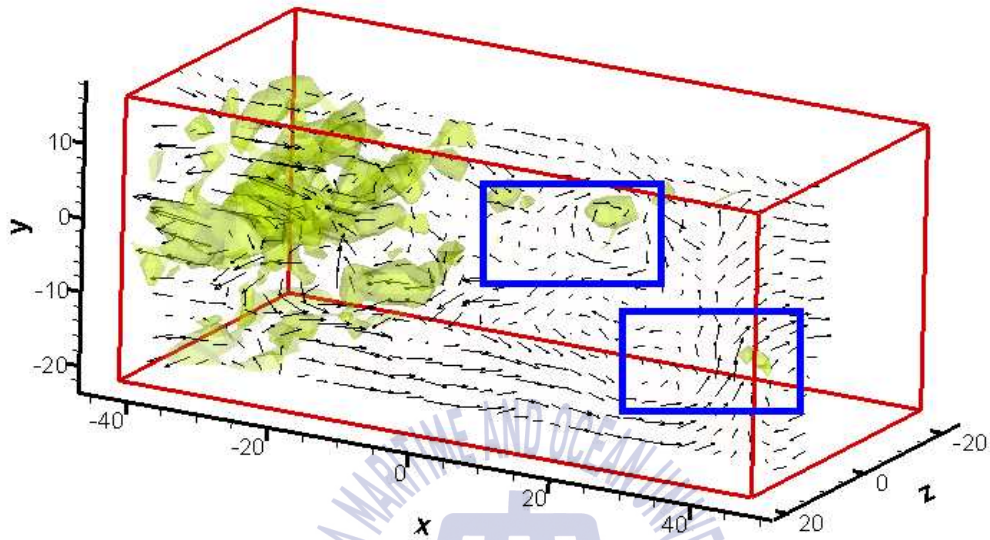


**Fig. 4.29** Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$  ,  $t = 0.06$ )

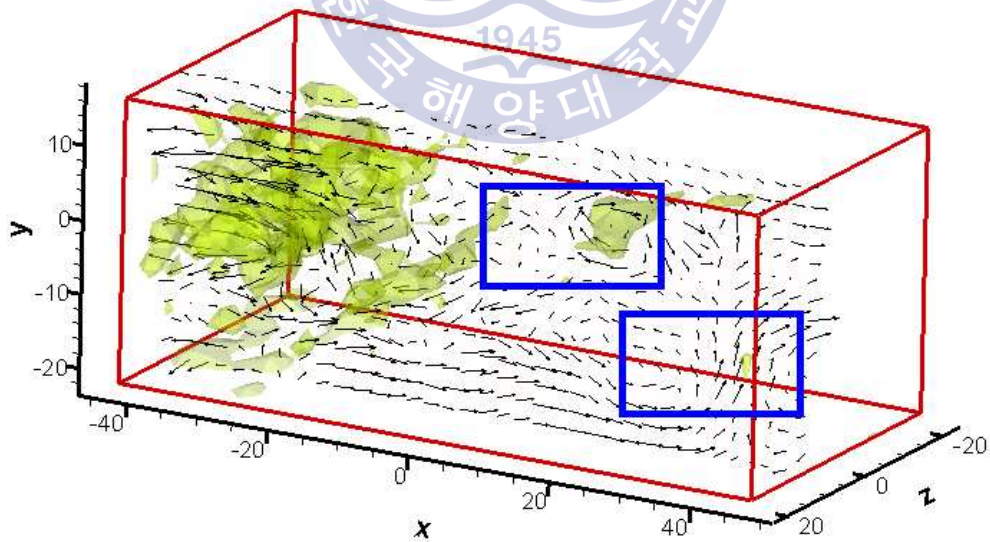


**Fig. 4.30** Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$  ,  $t = 0.07$ )





**Fig. 4.31** Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ ,  $t = 0.08$ )



**Fig. 4.32** Vector map of XY plane ( $Z = 8.24$ ,  $t = 0.09$ )



## 제5장 결론 및 고찰

Tomo-PIV계산에 있어서 속도벡터의 오차에 영향을 미치는 인자를 2가지 선정하여 인자에 대한 각 기법에 대한 오차 측정방법 및 정량적 오차량을 추정하였다. 기존의 변환 행렬법은 높은 수준의 오차를 내포하고 있으며 쌍곡선의 형태를 지니고 있었을 알 수 있었다. 그에 비해 외부요소 10-파라미터법은 낮은 수준의 오차를 내포하고 있음을 알 수 있었다. 이는 10-파라미터법을 이용한 카메라 교정이 적합함을 알 수 있다.

2차원 영상을 2대의 카메라로 분할시킨 뒤 MLOS, MART, SMART을 적용하였을 때 MART와 SMART는 적합하지 않은 것으로 나타났다. 이를 바탕으로 4대의 카메라 파라미터 이용하여 링와(ring vortex) 형태의 유동장의 가상영상을 이용하여 MLOS의 기법으로 복셀영상을 재구성한 다음, Tomo-PIV계산을 수행한 결과 링(ring)형태의 유동패턴을 재구성할 수 있었다.

구축한 MLOS기반의 Tomo-PIV계산방식으로 사각형 물수체 후류에 대한 실험 계산한 결과 2차 와(secondary vortex)를 재현할 수 있었다.

하지만, MLOS, MART, SMART법을 3차원 실제 실험영상에 적용하였을 때에 각각의 Tomo-PIV계산 성능은 재차 정량적으로 평가할 필요가 있다.

## 참고문헌

- [1] Adrian RJ (1991) Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics. Ann Rev of Fluid Mech 23: 261-304
- [2] Juyang Weng (1992) Camera Calibration with Distortion Models and Accuracy Evaluation. IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence, vol. 14, No. 10
- [3] Doh. (2004) A Study on the Development of a Three-Dimensional Measurement System for Flow-Structure Interaction Using Digital Image Processing. KSO, Vol.18 No.4 pp. 1-78, Journal of Visualization
- [4] Zhengyou Zhang (1998) A Flexible New Technique for Camera Calibration. IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11):1330-1334, 2000
- [5] Debasish Mishra, K. Muralidhar, P. Munshi (1999) A robust mart algorithm for tomographic applications. Numerical Heat Transfer: Part B: Fundamentals 35 (4), 485-506

[6] Herman GT, Lent A (1976) Iterative reconstruction algorithms. Computers in biology and medicine 6 (4), 273–294

[7] AC Kak (1999) Principles of computerized tomographic imaging. Society for Industrial and Applied Mathematics

[8] NA Worth, TB Nickels (2008) Acceleration of Tomo-PIV by estimating the initial volume intensity distribution. Experiments in Fluids 45 (5), 847

[9] R Gordon, GT Herman (1971) Reconstruction of pictures from their projections. Communications of the ACM 14 (12), 759–768

[10] R Gordon, GT Herman, SA Johnson (1975) Image reconstruction from projections. Scientific American 233 (4), 56–61, 64–68

[11] Callum Atkinson and Julio Soria (2009) An efficient simultaneous reconstruction technique for tomographic particle image velocimetry. Experiments in Fluids 47 (4–5), 553

[12] Y. H. Kim (2012) Performance evaluation of Volume PTV based on Affine transformation and measurement the wake of a circular cylinder.

[13] S. Y. Kweon (2012) Simultaneous Measurements of the Wake Flow of a Circular Cylinder with a Flexible Film and Its Motions using Tomographic Imaging Technique

[14] EH Adelson, JR Bergen (1991) The plenoptic function and the elements of early vision. Vision and Modeling Group, Media Laboratory, Massachusetts Institute of Technology

[15] R Szeliski (2010) Computer vision: algorithms and applications. Springer Science & Business Media (URL : <http://szeliski.org/Book/> )

[16] C.T. Chen, Y.U Idzerda, H. Lin, N.V. Smith, G. Meigs, E. Chaban, G.H. Ho, E. Pellegrin, F. Sette, (1995) Experimental confirmation of the X-ray magnetic circular dichroism sum rules for iron and cobalt. Physical Review Letters; ISSN 0031-9007 v. 75(1); p. 152-155

[17] MG Kivelson (1995) Introduction to space physics. Cambridge

University Press (URL :  
[https://books.google.co.kr/books/about/Introduction\\_to\\_Space\\_Physics.html?id=qWHSqXGfsfQC](https://books.google.co.kr/books/about/Introduction_to_Space_Physics.html?id=qWHSqXGfsfQC))

[18] F. Scarano, M. L. Riethmüller (1999) Iterative multigrid approach in PIV image processing with discrete window offset. Experiments in Fluids 26 513—523



## 감사의 글

우선 제가 대학교에 다닐 수 있게 지원해주신 부모님께 감사드리고 대학 생활 간 도움을 준 형에게 감사드립니다.

군대에서부터 들어가 공부해보고 싶었던 실험실에 흔쾌히 받아주시고 아무런 부담 없이 공부를 할 수 있는 환경을 제공해주신 교수님께 항상 감사합니다. 교수님 덕분에 큰 일없이 석사를 마무리를 지을 수 있게 되었습니다.

우리 또 래행님 해드린 것도 없는데 아무 조건 없이 부탁드린 것 다 들어주셔서 감사합니다. 행님의 프로그램 덕분에 많이 배웠습니다. 그리고 맥주 막타는 죄송하게 생각하고 있습니다. 옆에서 많은 도움 못 드려서 항상 죄송합니다.

같이 졸업하는 이끄-원 듀오행님들도 많이 챙겨줘서 편하게 지냈던 것 같네요. 영환이도 실험할 때 서로 좋은 호흡으로 진행해서 원활하게 된 것 같아 고맙다. 준호 행님도 이런저런 방면으로 많이 챙겨주셔서 편하게 지낼 수 있었습니다. 감사합니다.

좀 늦게 들어와서 얼마 못보고 가지만 장호도 실험하는 것 도와줘서 빨리 끝낼 수 있었던 실험이 많았던 것 같아 고맙다. 산, 성진 듀오 노예처럼 부려먹어도 웃으면서 지내줘서 고맙다. 호오진이도 짧지만 문제없이 지내줘서 고맙다. 한 페이지에 적기엔 너무 많이 감사할 부분들이 있어서

다 적지를 못하는 점 양해 부탁드립니다. 글자로 다 적지는 못하지만 항상 크게 감사합니다.

